# técnica

376

associação dos e[illegible]s do instituto superior técnico

março [illegible]

revista de engenharia

**VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40**
**(«Heliaço» e «SNT 40»)**

**TENSÕES DE SEGURANÇA**
Ra = 2400 kg/cm²
e
Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

**Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente**

# HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

**Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77**

# UNIÃO ELÉCTRICA PORTUGUESA

S. A. R. L.

SEDE

**Rua de Alexandre Herculano, 244 — PORTO**

TELEFONES: 2 76 76 / 77 / 78 / 79 — Est. 90

DELEGAÇÃO

**Rua Rosa Araújo, 35 — LISBOA**

TEL.: 73 11 81/82/83/84/85/86 - 73 33 33 - 48 491

●

ELECTRICIDADE DO LINDOSO
E DAS CENTRAIS DO FREIXO
E DA CACHOFARRA

●

A UNIÃO ELÉCTRICA PORTUGUESA distribui, pela mais extensa rede de alta tensão em Portugal (cerca de 2 500 km), energia eléctrica em 70 concelhos, nos distritos de VIANA DO CASTELO, BRAGA, PORTO, AVEIRO, COIMBRA, VISEU, LEIRIA, SETÚBAL e ÉVORA.

# CIMENTO SECIL

**Fábrica:**

Outão — Setúbal

**Telef. 228824/5**

**Escritório:**

R. do Comércio, 56-3.º

**LISBOA 2**

**Telef. 328201/2/3**

# técnica

NÚMERO 376 MARÇO DE 1968 ANO XLIII VOLUME XXX PUBLICAÇÃO MENSAL



**Director**
Vítor M. M. Pinto

**Administrador**
Vítor Coias e Silva

**Redactores**
Ana Maria Sobral
A. J. Tavares Pires
J. C. Alves da Silva
João M. Pereira



**Editor e Proprietário**
Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico

**Redacção e Administração**
Avenida Rovisco Pais
Telefone 77 54 49
Lisboa 1

**Assinaturas**

| | | 5 N.os | 10 N.os |
|---|---|---|---|
| Continente e Ilhas | — | 70$00 | 130$00 |
| Ultramar, Brasil e Espanha | — | 80$00 | 140$00 |
| Estrangeiro | — | 90$00 | 150$00 |

**Número avulso — 20$00**

Não se publica em Agosto e Setembro.

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

*Composto e impresso na Tipografia Jorge Fernandes, Lda. — Rua da Cruz dos Poiais 103 — Lisboa*


# SUMÁRIO


**313** *ANTÓNIO CARRISSO* — **Cabora Bassa — Alguns apontamentos acerca deste aproveitamento.**
Some notes on the hidro-electric development of Cabora-Bassa.

**327** *CARLOS PORTELA* — **Introdução ao cálculo analógico.**
Introduction to analogic computation.

**343** *JOSÉ FOLQUE* — **Anotações sobre barragens de terra.**
Notes on earth dams.

**357** *LEOPOLDO CORTEZ* — **Princípios gerais e métodos de investigação na flutuação de minérios.**
Ore flotation: general principles and investigation methods.

**379** **Do Mundo Técnico**
Novo computador electrónico de mesa — Ciclotrões isócronos compactos.

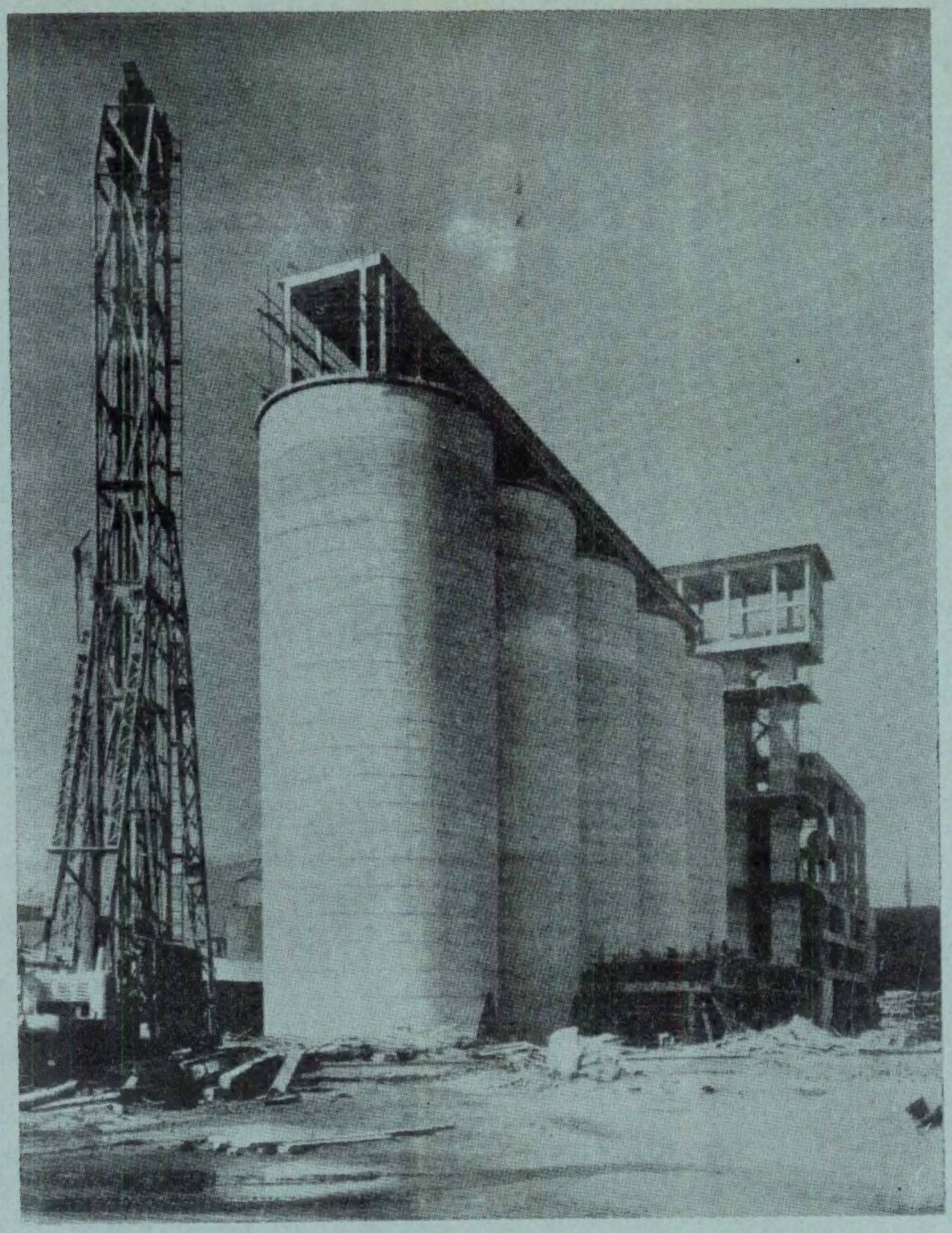
**342** **Notas Informativas**
Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional.

**Bibliografia**


CAPA: Ensaio para determinação da tensão de disrupção a seco do Isolador ALH — Empresa Electro-Cerâmica.

# ÍNDICE ALFABÉTICO DOS ANUNCIANTES


| | Pág. |
|---|---|
| AEG | XIX |
| A. Johnson & Co (Portugal), Ltd. | XXIX |
| Aguiar e Melo, Lda. | XXX |
| Araldite | XXXIII |
| Asea Eléctrica | V, VII, XXXI e XXXIII |
| Auto-Lusitânia | 2.ª da capa |
| Cerâmica de Vale de Lobos, Lda. | XVIII |
| Cimento Secil | 2.ª da capa |
| Companhia de Cimentos Brancos | VI |
| Construções Técnicas | XV |
| Dial | XVIII |
| Electrotécnicos Reunidos | XII |
| Electro-Arco, Ltd.ª | II |
| Empresa de Cimentos de Leiria | XXXII |
| Empresa Electro Cerâmica | XXXI |
| Empresa de Produtos Asfálticos | X |
| Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Lda. | 3.ª da capa |
| Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos | XI |
| Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações | XVI |
| Fanafel | XVI |
| Fundações Franki, Lda. | I |
| Guedes & Almeida, Lda | VIII |
| Guedal | XVIII |
| Harker Sumner | XXIII |
| Heliaço | 2.ª da capa |
| I. S. T. | XXV |
| Jayme da Costa, Lda. | XVII |
| Johann Keller | V |
| J. F. Azevedo e Silva | IV |
| J. J. Silva & Irmão | V |
| J. Roma | VII |
| LISNAVE | XXV |
| MAGUE | XIII |
| Novobra, Lda. | XX |
| Oliveti | XXVI |
| Quinzena Técnica de Paris | XX |
| Romar | XIV |
| Rotring | XXVIII |
| Siemens | 4.ª da capa |
| Soc. Industrial Metalúrgica | XXVIII |
| Sociedade Portuguesa Cavan | VI |
| Sondagens e Fundações A. Cavaco | II |
| Sondagens Ródio, Lda. | VII |
| Sopecate | II |
| Standard Eléctrica | IX |
| STET | XXI |
| Tudor | XX |
| União Eléctrica Portuguesa | 2.ª da Capa |
| Wild Portugal, Lda. | III |



BATERIA DE 5 SILOS

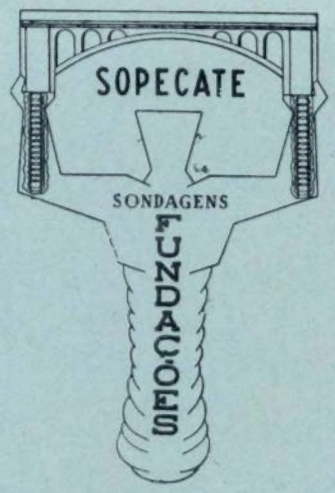

**Assente sobre Estacas FRANKI**

# FUNDAÇÕES FRANKI L.DA

RUA BRAAMCAMP, 13-3.º — LISBOA 1 — TEL. P. P. C. 53 41 12/3/4 — ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI — LISBOA

PRÉDIO SANTOS GIL, 6.º ANDAR — SALA 10 — TEL. 9 11 67 — CAIXA POSTAL 1397

ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI—LOURENÇO MARQUES




# SOPECATE

## SONDAGENS
## FUNDAÇÕES

Escritório — R. DO ARSENAL, 146, 2.º Esq., Dt.º e Fr.te
Estaleiro e Oficina — RUA PEREIRA HENRIQUES, 58

TELEFONES
SERVIÇOS ADMINISTRATIVOS 34010
SERVIÇOS TÉCNICOS 320208
ESTALEIRO E OFICINAS 381238

LISBOA

• ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA

• SONDAGENS

• REBAIXAMENTO DE NÍVEIS AQUÍFEROS

• FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA, 62, R/C ESQ. — LISBOA - 1
- TELEF. 56 11 71/72/73

# ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS ✦ POSTOS ✦ ACESSÓRIOS
PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

*

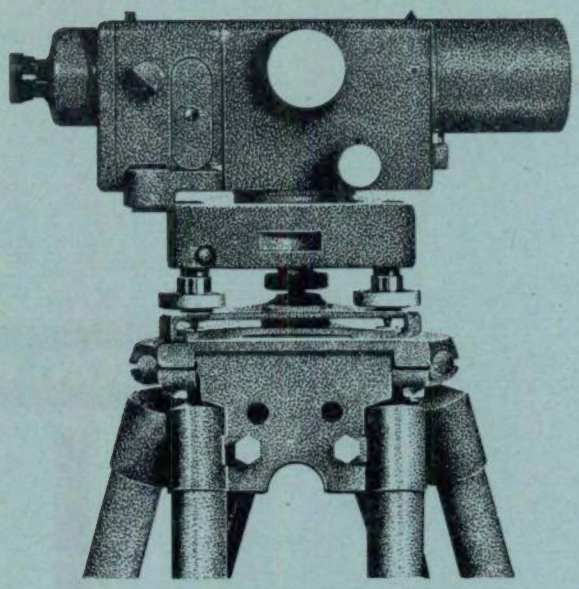
MATERIAL APROVADO PELOS
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93
FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33
PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73

# O novo Nível automático de engenheiro

## WILD NAK 2

com círculo horizontal



WILD
HEERBRUGG

Para nivelamentos de média e grande precisão; com micrómetro de lâmina de faces plano-paralelas para nivelamentos de grande precisão.

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo: ± 1,5 mm

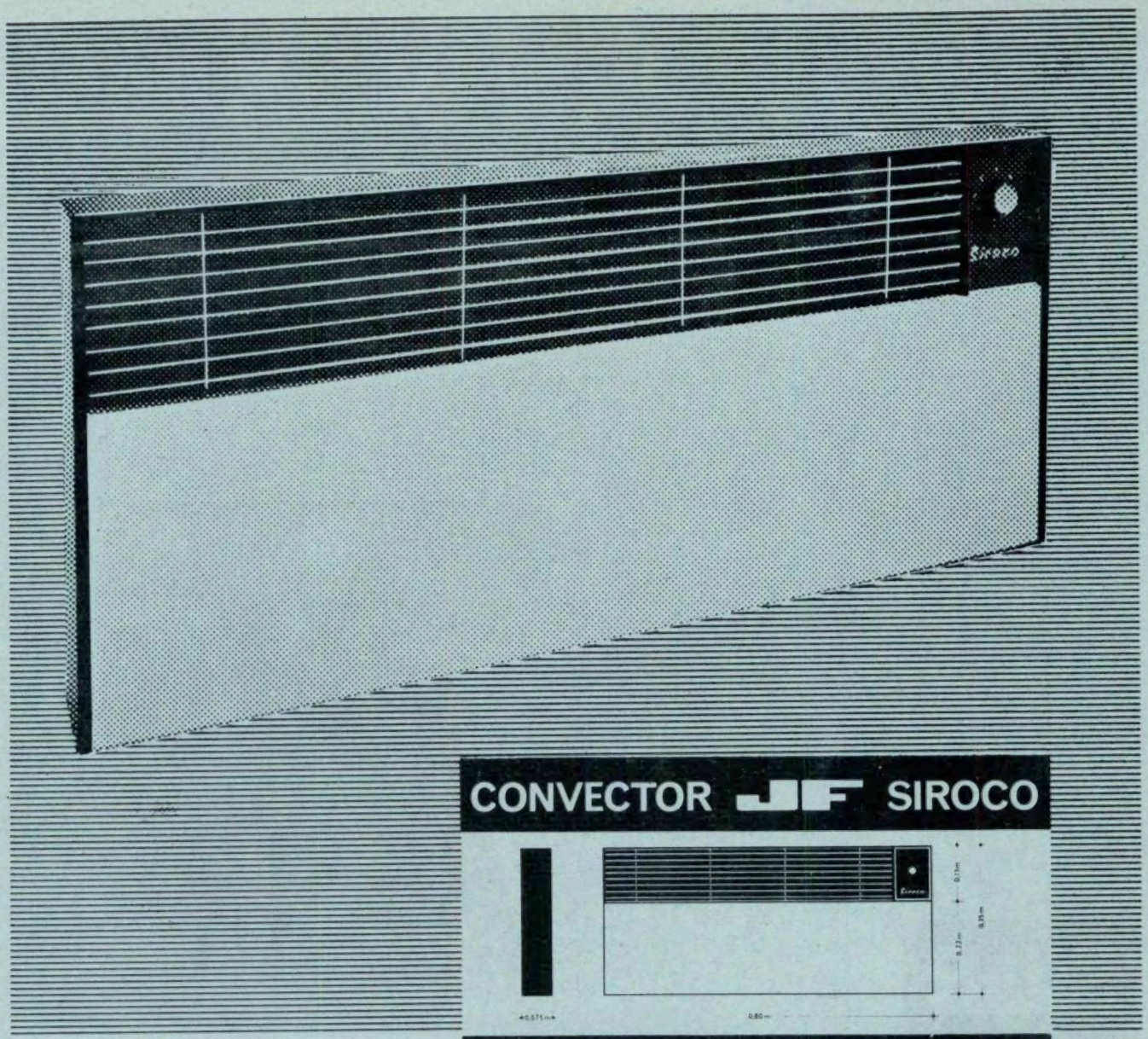
Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo com micrómetro: ± 0,4 mm

Luneta de 30 × de aumento com imagem direita de observação

Solicitem catálogo ou demonstração aos representantes exclusivos

**WILD PORTUGAL, LDA.**

PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8
LISBOA - 2 — TELEFONE 68 91 12




# CONVECTOR DE MONTAGEM SALIENTE

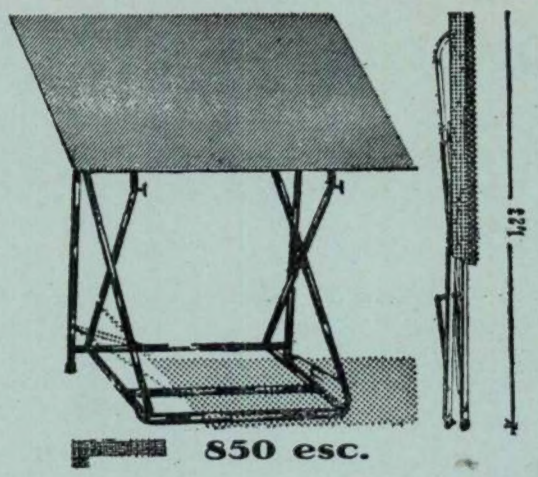
- Disponíveis em potências de 1000, 1500 e 2000 W
- Reduzida saliência depois de montado
- Pintura sintética de secagem à estufa sobre um primário anti-corrosivo de base fosfórica do tipo Wash-primer
- Acabamento de duas cores: preto mate e marfim
- Funcionamento a baixa temperatura
- Aquecimento da frente do aparelho pràticamente nulo
- Facilidade de montagem
- Termostato de funcionamento silencioso e com a posição de desligamento total
- Saída do ar quente estudada para evitar o enegrecimento das paredes

Impar

JF

J. F. DE AZEVEDO E SILVA & C.ª, L.DA

**Rua S. Francisco Sales, 2** **Telef. 654165 · Lisboa-1**



**850 esc.**

**CARACTERÍSTICAS:** Tubo de aço, articulado em qualquer posição, várias inclinações, fàcilmente transportável, não ocupa espaço quando fechado, pranchete de 1,20 × 0,80 de madeira, em tela. Pintura de estufa.

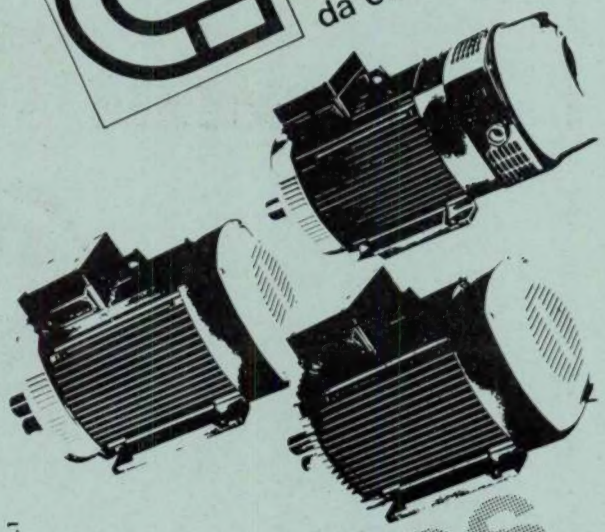
Em exposição, outros modelos de madeira e metálicos e todo o material de consumo e equipamento de desenho, escritório e papelaria

*Distribuidores exclusivos, em Lisboa, do estirador da* ***Fábrica Olaio***

**J. J. SILVA & IRMÃO, LDA.**

rua silva carvalho 232-b · lisboa · telefone **652750 / 680671**

Uma força criadora no domínio da electricidade



MARCA · A.E.I

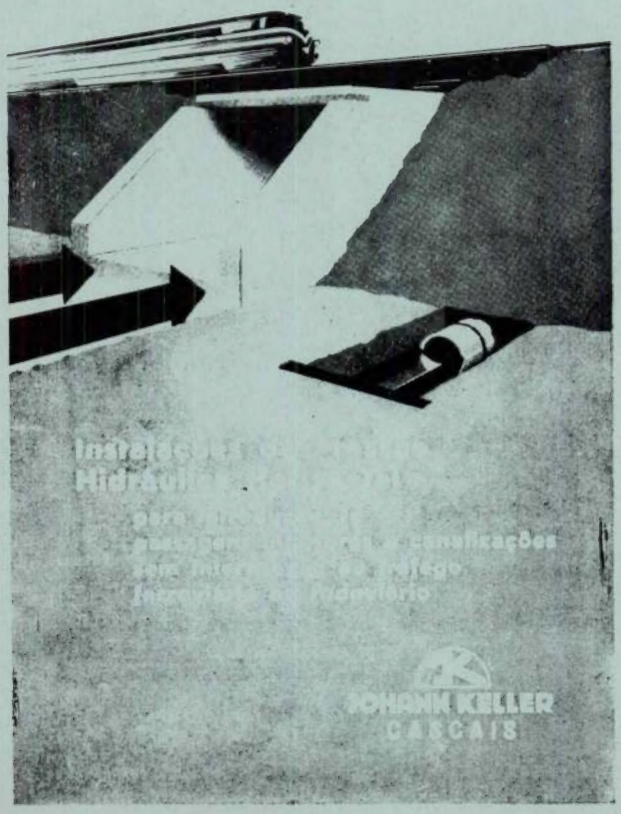
# Motores ASEA

Vasta gama de motores, adequados a cada fim, caracterizados por grande robustez mecânica e excelente arranque.

**ASEA ELÉCTRICA LDA.**

Estrada do Prior Velho
Tel. 251101*
SACAVÉM

R. do Campo Alegre, 144
Tel. 62106/7
PORTO



# O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

**permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos**

**Estude a vantagem do emprego do**

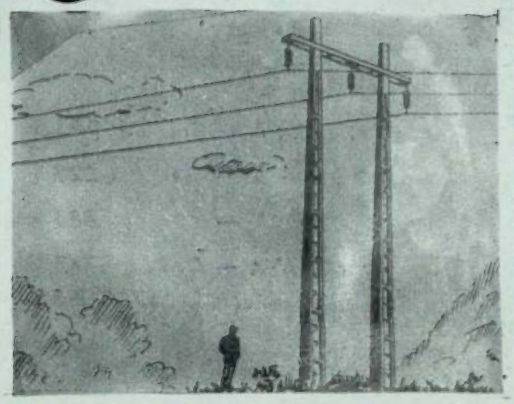
## CIMENTO BRANCO LUSO

**Consulte os distribuidores gerais**

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS
COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

SOCIEDADE PORTUGUESA
Carvam



RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A-LISBOA-1 -TELEF. 47812-50129

# SONDAGENS RÓDIO, L.DA

LISBOA

RUA DE S. BENTO, 644-3.º

Telefones: 68 80 96/7/8 ✦ Telegramas: BETANSOL

SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
ESTACAS GUNITA
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS
CONGELAÇÃO DO TERRENO
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ABAIXAMENTO DO LENÇOL DE ÁGUA

—//—

Engenheiro Consultor: **Walter Weyermann**



MARCA - A.E.3

Uma força criadora no domínio da electricidade

Contactores ASEA

Uma linha completa de contactores para todos os calibres de pequenas dimensões, práticos de montar e desmontar, sem problemas de manutenção e fáceis de ligar.

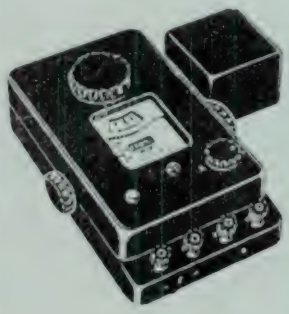
**ASEA ELÉCTRICA LDA.**

Estrada do Prior Velho
Tel. 2511101*
SACAVÉM

R. do Campo Alegre, 144
Tel. 62106/7
PORTO



- SOLDADURA ELÉCTRICA
- MATERIAL DE PROTECÇÃO



**Aparelhagem de medidas eléctricas**

- indicadora
- reguladora
- registadora

## J. ROMA, L.DA

P. da Figueira, 12, 1.º — LISBOA Tel. 865151

P. do Município, 309-6.º S. 3 — PORTO Tel. 0236732

WABCO

WESTINGHOUSE
AIR BRAKE COMPANY

Construction Equipment Division
Peoria (Illinois) 61601

# MOTO-SCRAPERS AUTO-CARREGADORES

CAPACIDADE DE 11, 21 E 31 JARDAS CÚBICAS

NÃO NECESSITA DE TRACTOR PARA EMPURRE!
UMA SÓ MÁQUINA... UM SÓ OPERADOR...

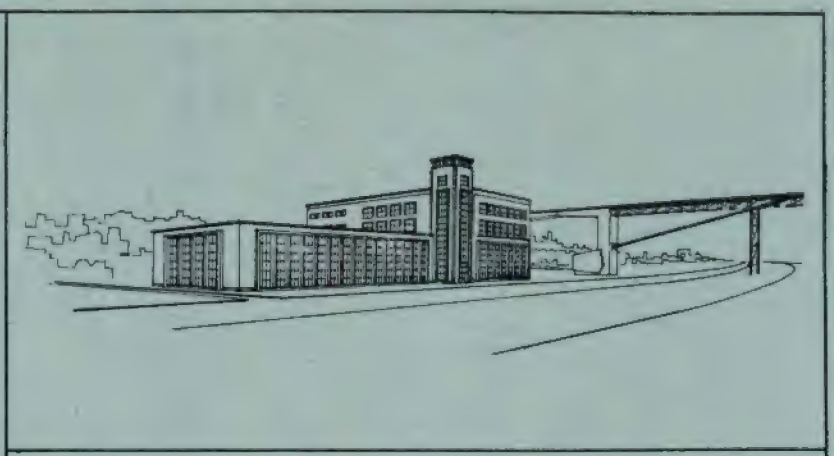
**Escarifica... Carrega... Transporta... Descarrega... Em terrenos de toda a natureza!**

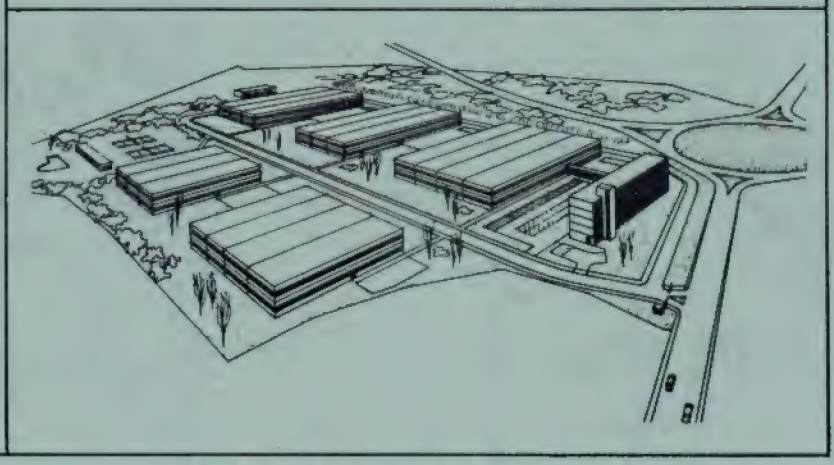
DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

## GUEDES & ALMEIDA LDA.

**Rua Áurea, 181-2.° — LISBOA-2 — TELEFS. 32 50 80 e 32 78 45**

Através das suas organizações de: LISBOA • LUANDA LOBITO • NOVA LISBOA e Agências de: PORTO, GUINÉ, S. TOMÉ E PRÍNCIPE e CABO VERDE fornecerá todos os elementos técnicos, para criteriosa escolha, assistência técnica e sobresselentes.
A1-a





# O CRESCIMENTO COMO FACTOR DE DESENVOLVIMENTO

Tal como as árvores, quando bem cuidadas, criam raizes, crescem, ramificam-se e dão bons frutos, assim as empresas, quando bem dirigidas, definem uma posição, desenvolvem-se, diversificam as suas actividades e lançam nos mercados produtos de alta qualidade.

A Standard Eléctrica, pioneira da indústria das Telecomunicações e Electrónica em Portugal, que em 1932 não dispunha de mais de uma escassa dezena de empregados, conta hoje com mais de 2200 pessoas nas suas fábricas de Lisboa, Cascais e Luanda. O ritmo de crescimento e expansão tem sido de tal modo elevado que o volume de vendas passou de 30 000 contos em 1957 para 300 000 em 1967, prevendo-se que em 1970 a produção total da Standard Eléctrica atinja o valor de 1 500 000 contos, dos quais 1 000 000 se destinam à exportação.

A Standard Eléctrica é, pois, um valor positivo na indústria nacional, que tem como base o elevado nível técnico e profissional e ainda o magnífico esforço de todos os que nela trabalham.

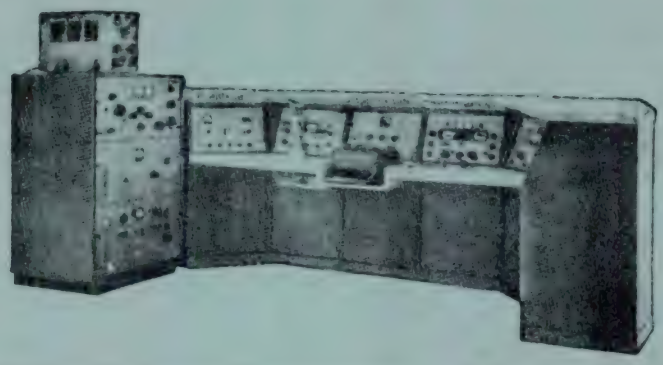
**Standard Eléctrica** **ITT**

PARA COLAGEM DE TACOS DE MADEIRA USE:

*Também próprio para:*
*impermeabilizar terrenos,*
*paredes, fundações, etc.*

*FÁBRICA EM SACAVÉM*

RUA FILIPE FOLQUE-10 1º— LISBOA
TELEF. 53 01 56 —TELEG EPALDA-LISBOA



## Comunicações

**equipamentos**
**e sistemas completos**

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

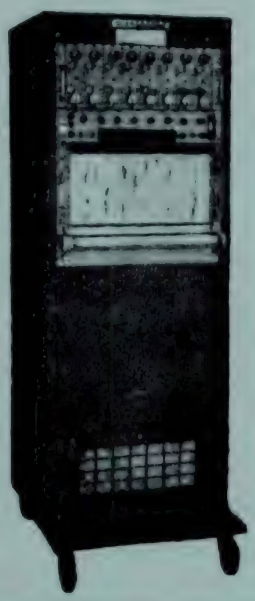
**THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION**

**HEWLETT** **PACKARD**

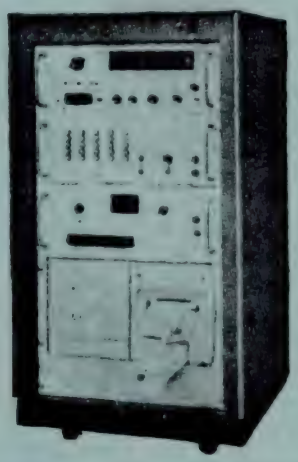
**aparelhagem electrónica de medida e registo**

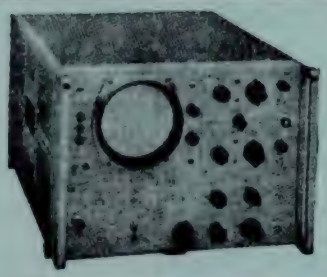
Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador Sanborn



Registador digital Dymec





Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

**TELECTRA** EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.

# PPC DE HOTEL

**TELEFONBAU UND NORMALZEIT**

Os P. P. C. da Telefonbau são fabricados em 3 modelos com capacidades de 30 a 200 extensões e permitem a ligação de serviços especiais para a indústria hoteleira, nomeadamente serviço de despertar automático, chamada de criados, bloqueamento da linha de rede, inter-ligação com central automática privativa.

ELECTROTÉCNICOS REUNIDOS Lda.

Av. duque d'avila, 66-3° telef. 41161/5 LISBOA

técnica

NUMERO 376 MARÇO DE 1968 ANO XLIII VOL. XXX PUBLICAÇÃO MENSAL

C. D. U. 621.311.21 (679)

# CABORA-BASSA

## ALGUNS APONTAMENTOS ÀCERCA DESTE APROVEITAMENTO (*)

por ANTÓNIO CARRISSO
Engenheiro Electrotécnico
Prof. I. S. T.

RESUMO

*Faz-se uma descrição sumária do aproveitamento para pôr em evidência as suas excepcionais possibilidades energéticas. Define-se a concepção do aproveitamento e a localização dos seus orgãos essenciais. Refere-se a linha de transporte de energia para a África do Sul e salienta-se a opção entre corrente alternada e corrente contínua a muito alta tensão.*

SYNOPSIS

*A short discription of the hydro-electric development is made as to emphazise its exceptional energetic possibilities. The conception of the development and the location of its essential equipment are defined. The transmission line to the Republic of South Africa is then refered, and the option between alternating current and very high-voltage direct current is focused.*

Pediram-me os alunos organizadores desta «Semana de Electrotecnia», que nelas colaborasse com uma palestra àcerca do aproveitamento de Cabora-Bassa.

A vastidão do tema sugerido e a forma vaga como foi definido, obriga desde logo a uma opção entre:

*a*) — fazer uma descrição geral da concepção da obra, embora focando em particular os aspectos mais directamente ligados ao domínio da electrotecnia;

*b*) — tratar ao nível do I. S. T. os problemas específicos dos sistemas de produção e de transporte da energia eléctrica.

Qualquer destes dois últimos domínios — produção e transporte — dariam por si só, em face da vastidão e complexidade dos problemos ligados a uma realização desta envergadura, uma série de conferências a realizar por técnicos diferentes, cada um dentro do âmbito restrito cujo estudo tenha aprofundado. Uma palestra desgarrada, àcerca de um desses problemas, careceria de significado.

É-se assim conduzido naturalmente a optar pelo primeiro tema:

«Pôr em evidência o conjunto de factores de que advêm as excepcionais possibilidades energéticas de Cabora-Bassa, que o colocam a par das grandes realizações mundiais, destacando os critérios que orientarem as concepções básicas no âmbito da electrotecnia e descrevendo, nas suas linhas mestras, as soluções previstas para resolver os problemas mais salientes neste domínio.»

Para se compreenderem as excepcionais possibilidades energéticas do aproveitamento de Cabora-Bassa há que conhecer o aspecto

(*) Conferência proferida na II Semana de Engenharia Electrotécnica, I. S. T., Janeiro de 1968.

geográfico do curso do rio Zambeze em Moçambique.

O rio entra em Moçambique, junto ao posto fronteiriço do Zumbo, aproximadamente à cota 330 m. Desce por uma planície de pequena inclinação, que vai estreitando à medida que se aproxima de uma região montanhosa, situada a cerca de 250 km da fronteira, através da qual o rio abre caminho por vales mais ou menos estreitos e profundos, que por vezes afunilam para apertadas gargantas de margens alcantiladas e inacessíveis. Segue-se depois nova planície de muito pequeno declive, cada vez mais larga, onde as águas do Zambeze terminam tranquilamente o seu curso, antes de se perderem no Oceano Índico.

À entrada dessa serra, que pretendia barrar o caminho do Zambeze, encontra-se a garganta de Cabora-Bassa, que se pode ver na fig. 1.

O leito do rio vai estreitando até às rochas que se vêem logo a seguir à curva. É aí que se projecta construir a barragem do primeiro aproveitamento hidro-eléctrico do rio Zambeze em território nacional.

Fig. 1

A cota à superfície da água, depende evidentemente do caudal, mas anda à roda dos 200 m. O planalto onde se instalará o bairro residencial situa-se à cota aproximada de 800 m. A serra terá pois uma altura de uns 600 m ou 700 m.

No local previsto para a barragem a natureza colocou dois enormes gigantes de pedra, um em cada margem, de faces verticais com cerca de 150 m de altura, para diminuir o comprimento da barragem e melhorar os seus encontros.

Neste local, tão generosamente dotado pela natureza para implantação de uma barragem, o fundo do leito do rio está aproximadamente à cota 170 m. Em relação à entrada do Zambeze em território nacional há pois um desnível de uns 160 m aproximadamente.

Se aí se construir uma barragem com uma altura um pouco superior a este valor, mas cuja cota máxima de retenção não ultrapasse a da entrada do rio em Moçambique, pode criar-se uma enorme albufeira, com 250 km de comprimento, sem que o seu regolfo inunde território alheio.

Mercê das condições geográficas excepcionalmente favoráveis é possível, com uma barragem relativamente pequena, criar uma albufeira com uma capacidade útil da ordem dos 52 000 milhões de $m^3$, inundando uma área da ordem dos 2800 $km^2$.

Para se «sentir» a capacidade útil desta albufeira, convém recordar que a de Castelo de Bode, a maior da metrópole, tem uma capacidade útil de 875 milhões de $m^3$ ou seja 60 vezes menor do que a de Cabora-Bassa.

Se a barragem se construisse em Lisboa, e o terreno tivesse a mesma configuração, o regolfo quase atingiria Mérida e inundaria uma área superior a metade do Algarve.

A estas condições favoráveis há ainda que juntar mais estas duas:

1) — Cabora-Bassa é o segundo escalão a construir sobre o Zambeze e situa-se a jusante de Kariba, o primeiro escalão já construído a cerca de 400 ou 500 km a montante.

Kariba tem também uma grande albufeira, que lhe garante elevada regularização de caudais, de

que Cabora-Bassa virá a beneficiar por se situar a jusante.

2) — A este caudal afluente, turbinado ou descarregado em Kariba, há que adicionar o recolhido na grande bacia hidrográfica do Zambeze entre os dois aproveitamentos. Esta é limitada a sul pela linha de alturas que passa um pouco a sul de Salisbury e, a norte, cobre toda a região compreendida entre Lusaka, Broken Hill, serra de Muchinga e a fronteira com o Malawi. A bacia hidrográfica do Zambeze em Cabora-Bassa é da ordem dos 900 000 km$^2$, quase o dobro da superfície da Península Ibérica.

Se me é permitida nova ficção, correspondia a turbinar, à entrada dos Pirinéus, as águas provenientes da bacia hidrográfica constituída por Portugal, Espanha e quase toda a França.

Graças a este conjunto de circunstâncias favoráveis — elevados caudais afluentes, em parte já regularizados, e enorme albufeira de armazenamento — a produção anual garantida do aproveitamento de Cabora-Bassa eleva-se a uns 18 000 milhões de kWh ou, para usar unidades mais cómodas, 18 000 GWh anuais, valor que corresponde a cerca de 3,5 vezes a energia total produzida na metrópole, que em 1966 atingiu cerca de 5300 GWh.

| | Unidades | Cabora-Bassa | Castelo de Bode |
|---|---|---|---|
| Barragem | | | |
| Altura . . . . . | m | 160 | 115 |
| Comprimento no coroamento . . | m | 300 | 300 |
| Volume de betão | $10^3$ m$^3$ | 500 | 430 |
| Albufeira. . . . . | $10^6$ m$^3$ | 52 000 | 875 |
| Potência instalada | MW | 3600 | 136 |
| Energia produtível | Gwh/ano | 18 000 | 380 |

A comparação entre os aproveitamentos de Cabora-Bassa e de Castelo de Bode, indicada no quadro acima, mostra que as barragens são da mesma ordem de grandeza e que para tornar comparáveis os respectivos valores energéticos há que mudar de unidades.

Como corolário desta comparação conclui-se que o custo da energia será nitidamente mais baixo em Cabora-Bassa, por ser muito mais elevada a energia produtível anualmente neste último aproveitamento.

Neste particular o processo do concurso especifica que nos estudos económicos se valorize a energia perdida em 8 centavos o kWh.

Mas a grande potencialidade energética e o baixo custo de produção da energia não são suficientes, por si só, para garantir a viabilidade económica de um aproveitamento. Há ainda que garantir o equilíbrio entre os termos de trinómio:

### Produção — Transporte — Consumo

Não basta a possibilidade de produzir grande volume de energia a baixo preço. É necessário haver quem o consuma, isto é, que existam centros consumidores, populacionais e ou industriais, onde a energia possa ser colocada a preço competitivo.

E num aproveitamento com tão elevada capacidade energética como Cabora-Bassa o problema da colocação da sua energia assume fatalmente aspectos graves.

A província de Moçambique consome actualmente uns 300 GWh anuais. Pode admitir-se que ela consumirá 600 GWh em 1973 e 1400 GWh em 1980, se se mantiver a taxa de crescimento anual de 13 % que se tem verificado nos últimos anos.

Mesmo entrando em linha de conta com o previsível aumento de consumo, que resulta das possibilidades de fomento associadas a uma grande disponibilidade de energia a baixo preço como Cabora-Bassa, o consumo de energia em Moçambique não atingirá na próxima década um volume que justifique a construção do aproveitamento.

Há pois que pensar em exportar a energia. É do domínio público que nesse sentido tem havido conversações com a República da África do Sul (R. A. S.), com a Rodésia e com o Malawi. Destes países vizinhos só a R. A. S., com um consumo anual da ordem dos 25 000 GWh e uma taxa de crescimento anual de 9 %, é um consumidor à escala de Cabora-Bassa. Os restantes países devem ser encarados como consumidores complementares, embora a sua contribuição para o interesse do aproveitamento não se deva considerar desprezável.

A venda de energia à R. A. S. implica, porém, a construção de uma linha de transporte que permita colocar a energia na região do Rand, seu grande centro industrial. Essa linha terá

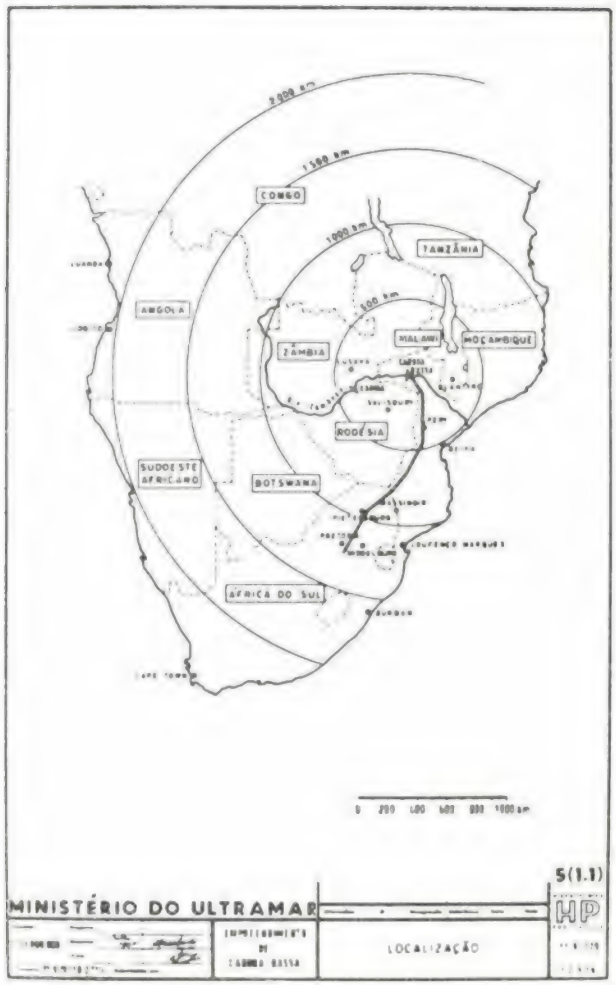



Fig. 2

um comprimento da ordem dos 1400 km, uma das mais longas, senão a mais longa, até hoje estudada. A sua capacidade de transporte será da ordem dos 2000 MW, que constitui igualmente um valor elevado dentre das linhas actualmente existentes ou em estudo.

Se se voltasse a colocar o aproveitamento em Lisboa, esta linha correspondia, grosso modo, a colocar em Paris cerca de 15 % da produção total da França.

Por ser determinante para a rentabilidade do aproveitamento o fornecimento da energia à R. A. S., o Caderno de Encargos pede propostas simultâneas para os sistemas produtor e de transporte para o Rand. Aí se fixam os seguintes valores base para a potência a garantir pelo produtor ao transportador:

em 1974 . . . . . ≃ 800 a 1000 MW
em 1980 . . . . . ≃ 2000 MW

com uma utilização mínima de 7000 horas anuais.

Referem-se os anos 1974 e 1980, por se prever ser o primeiro o da entrada em funcionamento do transporte para a R. A. S. e o segundo o da saturação da central sul do aproveitamento.

Penso que se construirão posteriormente uma linha para Salisbury e outra para Tete e Malawi que se prolongará para o norte de Moçambique. E quem sabe se num futuro mais longínquo não se virá a construir também uma linha para o Copperbelt. Naturalmente serão ainda necessárias linhas para alimentarem os restantes distritos da nossa província.

Mas por agora afigura-se-me prudente e razoável só pensar na central e instalações complementares e na linha de transporte para a R. A. S., isto é, no essencial para o arranque do sistema hidro-eléctrico do Zambeze ser uma realidade. O resto virá a seu tempo, por acréscimo.

E não pretendo com isto diminuir a importância dos restantes empreendimentos, essenciais sob os pontos de vista de valorização e fomento das possibilidades económicas e políticas da nossa província. Penso sòmente que os trabalhos se devem escalonar no tempo de forma a poder avançar-se com segurança.

O sistema produtor do Zambeze não se reduz ao aproveitamento de Cabora-Bassa; é muito mais ambicioso. Este não será mais do que o primeiro escalão em território nacional.

Fig. 3 dá-nos uma primeira ideia das possibilidades energéticas do Zambeze e dos seus afluentes. Se déssemos largas à exuberância latina seríamos tentados a dizer serem quase inesgotáveis os recursos hidro-eléctricos e hidro-agrícolas com que a natureza dotou esta região.

Sobre o Zambeze, a jusante de Cabora-Bassa, encontram-se sucessivamente os aproveitamentos de Mepanda-Uncua, à saída do maciço montanhoso, cuja possibilidade energética é cerca de 2/3 da de Cabora Bassa; Baroma e Lupata, cuja produção conjunta se julga ser da mesma ordem da de Cabora-Bassa.

No conjunto dos quatro aproveitamentos a energia produtível será da ordem dos 50 000 GWh, ou seja:

— cerca de 10 vezes a produção actual da metrópole

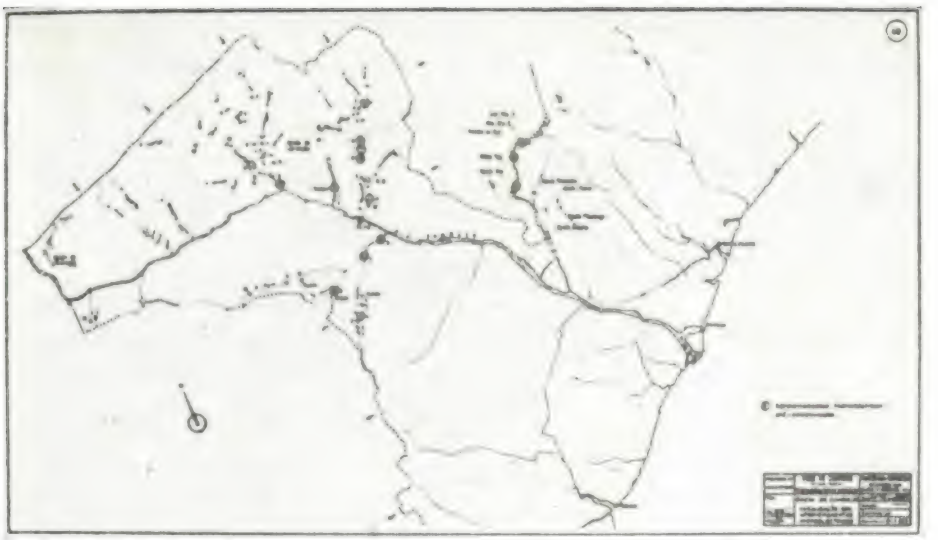


Fig. 3

— igual à produção total actual da Suécia ou da produção conjunta actual da Suíça e da Áustria ou da Bélgica e da Holanda
— metade da produção actual da França.

Deve notar-se, contudo, que os números indicados são provisórios, por serem aproximados, mas em ordem de grandeza são significativos.

* * *

Esboçado a traços largos o sistema hidro-eléctrico do Zambeze em território nacional e postas em evidência as suas possibilidades energéticas, vão referir-se algumas das soluções previstas no domínio de electrotecnia.

Comecemos, por exemplo, pela linha de transporte de energia de Cabora-Bassa para a R.A.S. Como se disse atrás ela terá:

Capacidade de transporte . . . . ≃ 2000 MW
Comprimento. . . . . ≃ 1400 km

Se o transporte se fizer em corrente alternada, 50 ciclos por segundo, será pràticamente uma linha de quarto de onda. Daí resultará uma regulação de tensão inaceitável na subestação terminal de Apolo, onde se fará a entrega da energia à R.A. S., se a linha não tiver sido convenientemente compensada. Basta recordar que numa linha não compensada, com o comprimento de 1400 km e trabalhando àquela frequência, são de esperar, em vasio, tensões na recepção da ordem de 9 vezes a tensão na emissão. Assim, se em Cabora-Bassa se tiver a tensão de 500 kV, em Apolo a tensão ultrapassaria 4000 kV, que destruiria todos os isolamentos nessa subestação.

Além disso, se a linha não estiver compensada, a estabilidade de funcionamento será inaceitável devido à grande desfasagem entre as tensões na emissão e recepção; é ainda de prever uma capacitância da linha suficiente para auto-excitar os grupos. A compensação terá pois que entrar em linha de conta com estes três factores, sendo de prever a necessidade de usar bobinas de compensação transversal e condensadores de compensação longitudinal, que, alem do mais, viriam encarecer extraordinàriamente a linha.

Pensa-se, em princípio, que o transporte seria feito, neste caso, por sistema trifásico à tensão nominal de 500 kV, construindo-se por questão de segurança pelo menos duas linhas idênticas, sobre apoios independentes.

As três dificuldades apontadas no início — regulação de tensão, estabilidade de funcionamento e auto-excitação dos grupos — desaparecem se o transporte for feito em corrente contínua a muito alta tensão.

A utilização da corrente contínua para transportar grandes volumes de energia a muito grandes distâncias está-se generalizando com velocidade crescente e já existem instalações em funcionamento que permitem ajuizar da sua fiabilidade e segurança de serviço, que se afiguram satisfatórias.

Para transportar 2000 MW a 1400 km o preço total da instalação, utilizando corrente contínua, afigura-se competitivo com o transporte em corrente alternada.

Se se optar pelo transporte em corrente contínua prevê-se, em princípio, equipar as subestações terminais — rectificadora em Cabora-Bassa e inversora na R.A.S. — com válvulas de vapor de mercúrio, construídas para a tensão nominal de 133 kV e intensidade nominal de 1800 A.

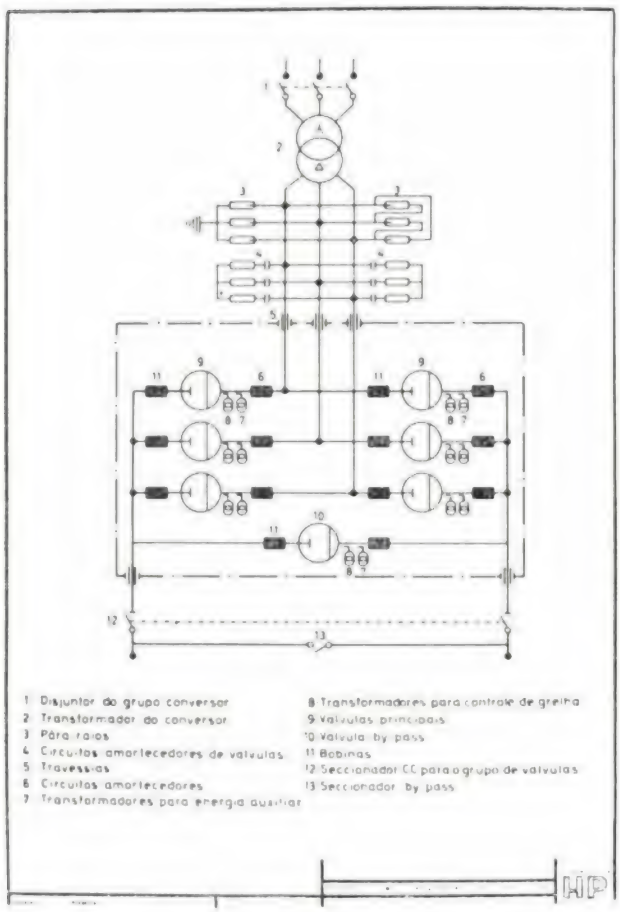



Fig. 4

As válvulas serão montadas segundo as clássicas pontes de Graetz trifásicas com rectificação de onda completa (fig. 4) e equipadas com válvula de bloqueio. Metade dessas pontes serão alimentadas por transformadores de adaptação estrela-estrela e a outra metade por transformadores triângulo-estrela de forma a eliminar as harmónicas 5 e 7 e obter-se, ao fim e ao cabo, sistemas rectificadores ou inversores dodecafásicos.

Como as pontes de Graetz estão associadas em série (fig. 5), segundo o esquema Thury, no caso de avaria de uma das válvulas da ponte a respectiva válvula de bloqueio curto-circuita o grupo, tirando-o portanto do circuito. Atendendo a que os defeitos podem ser fugitivos nomeadamente os arcos de retorno que constituem a avaria acidental mais frequente e inevitável, ao fim de curto intervalo de tempo a válvula desfaz o bloqueio e mete novamente o grupo em serviço. Se o defeito tiver desaparecido o grupo continuará ligado; caso contrário, se ele persistir, volta a bloquear o grupo até o fazer definitivamente, depois de um número conveniente de tentativas de reengate.

Em fase final montar-se-ão em cada subestação oito grupos de válvulas ligadas em série, com ponto médio à terra, a que corresponde uma tensão de transporte $\pm$ 533 kV em relação à terra. A tensão entre os feixes de condutores do sistema de transporte, onde circula a corrente de 1800 A, será pois de 1 066 000 V.

O número de válvulas, associadas em ponte de Graetz, ligadas em série irá aumentando de forma a acompanhar o crescimento do consumo e garantir o fornecimento da energia que lhe for pedida pelos consumidores com o mínimo de encargos financeiros e, portanto, o mais econòmicamente possível. O número de grupos de válvulas em serviço será, porém, sempre par pelas razões apontadas.

Como o funcionamento do sistema de transporte em corrente contínua se baseia na identidade das duas subestações, rectificadora e inversora, qualquer alteração na constituição de uma delas, proveniente de avaria ou de qualquer outra causa, convém ser acompanhada de idêntica alteração na outra.

É por isso pràticamente indispensável um sistema de tele-transmissão que informe, em todos os momentos, cada uma das subestações do regime de funcionamento da outra. Usa-se normalmente para esse fim um sistema de tele-informação utilizando a linha de transporte de energia (o clássico «Carrier»). Mas em caso de avaria deste sistema há que dispôr de outro de reserva, correntemente um canal privativo ou prioritário no sistema público de ligações telefónicas.

A localização de Cabora-Bassa pode obrigar, porém, a abandonar este circuito telefónico e a prever um circuito de rádio-comunicações estabelecido para esse fim, que poderá ser ou não comum ao que assegura as restantes comunica-

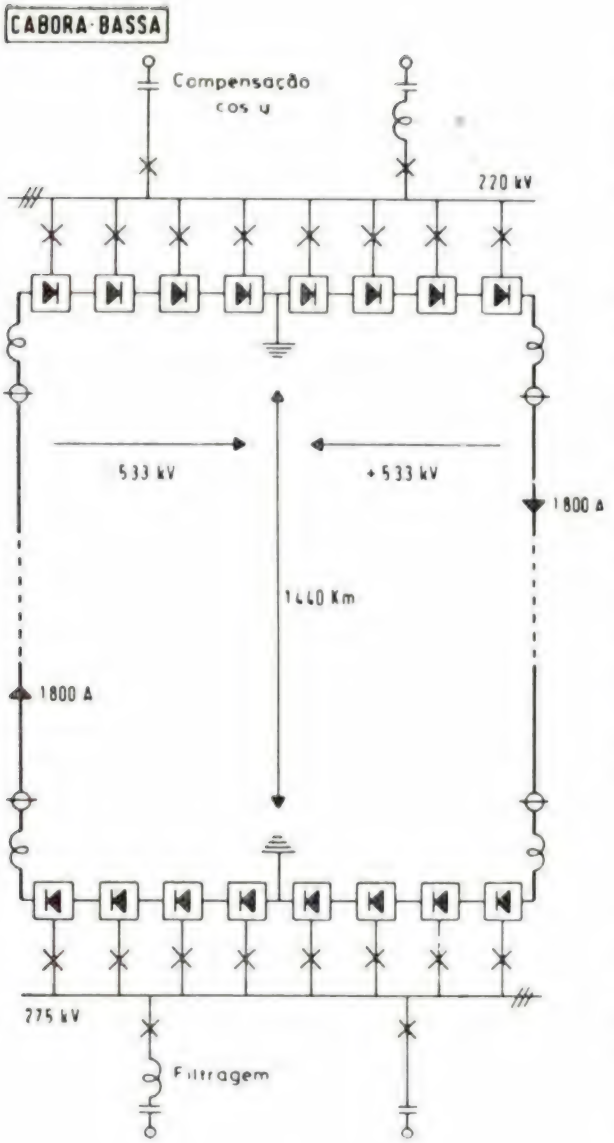



Fig. 5

ções do aproveitamento com a província. Não está ainda feita a opção se, neste caso, as comunicações serão feitas em UHF ou por dispersão tropoesférica.

Prevê-se a possibilidade do retorno da corrente do sistema de transporte ser feito pela terra em caso de emergência, se faltar um dos condutores da linha, o que obriga a uma construção muito cuidada dos eléctrodos de terra, como aliás é normal nestas instalações.

O sistema de transporte funciona com regulação a corrente constante, o que implica uma interligação com a regulação frequência-potência dos grupos geradores, para assegurar a estabilidade de funcionamento do conjunto.

Como as subestações conversoras são, em última análise, geradores de harmónicas é mister equipá-las com sistemas de filtragem, que reduzam a taxa das harmónicas a valores que não perturbem o funcionamento dos sistemas de corrente alternada a que estão ligados.

E há ainda que pensar no factor de potência, pois não é de admitir que, por falta da sua compensação, estática ou rotativa, se possa comprometer o funcionamento económico dos sistemas produtor e receptor a ele associados.

Como era de esperar, qualquer das duas soluções — transporte em corrente alternada ou contínua — envolvem um conjunto de problemas, naturalmente de índole e natureza diferentes, que é mister estudar e resolver antes de uma opção. Esta tem ainda de ser precedida da quantificação técnica e económica das duas possibilidades de transporte. E uma referência pormenorizada a estas questões saíria fora da índole e do tempo concedido a esta palestra. Cada uma delas conteria matéria de sobejo para uma ou várias conferências.

*
* *

E agora algumas palavras a respeito do sistema produtor de energia.

Para se produzirem 18000 GWh anuais, admitindo uma utilização anual de 6000 horas, é necessário dispor de uma potência de 3000 MW.

Convém repartir esta potência total por grupos de potência unitária o mais elevada possível, para beneficiar da melhoria de rendimento e diminuição do custo específico associados ao aumento de potência dos grupos. Não se deve, porém, exagerar a sua potência para não cair fora das possibilidados construtivas actuais, nem aumentar excessivamente o custo das unidades de reserva. Além disso a potência de cada grupo deve representar um escalão de produção que se adapte à evuloção da potência e da energia pedida pelos consumidores.

Ponderados estes condicionamentos, fixou-se em 400 MW a potência nominal a fornecer por cada grupo ao transportador, no barramento de entrega da subestação (fig 6).

Para vencer a ponta será pois necessário instalar 7 ou 8 grupos, conforme a utilização real for superior ou inferior às 6000 horas admitidas. Recorda-se neste particular, que se prevê uma utilização

de 7000 h para o maior consumidor (R.A.S)., o que aliás constitue uma das vantagens económicas do aproveitamento, pois acarreta uma apreciável diminuição do custo da energia.

Além destes grupos, que constituem a potência girante util, são ainda necessários mais dois, um de reserva e outro para entrar em serviço quando qualquer dos anteriores estiver em revisão.

Há pois que prever a instalação de 9 ou 10 grupos, o que corresponde a uma potência instalada de 3600 ou 4000 MW, que representa sensìvelmente o dobro da potência total instalada nas centrais da metrópole, incluindo as térmicas, que é cerca de 1800 MW.

Tem interesse ver a posição que ocupa a central de Cabora-Bassa entre as grandes centrais hidro-eléctricas.

No quadro inscreveram-se: a maior central da metrópole (Bemposta), a maior central portuguesa (Cambambe) quando, em fase final, tiver os quatro grupos instalados, a maior central africana ao sul do equador (Kariba) e a maior central europeia para cá da cortina de ferro (Alcântara). As maiores centrais para lá da cortina de ferro (Brastsk e Krasnoyarsk) figuram no fim do quadro entre as maiores centrais do Canadá e dos Estados Unidos e da nossa Cabora-Bassa, que se situa entre as cinco maiores centrais mundiais.

Mostra ainda o quadro que houve a intenção de colocar Cabora-Bassa a par das grandes realizações mundiais, sem contudo pretender estabelecer «máximos» mundiais no que se refere a potência de cada grupo e ao número de grupos instalados. Bem pelo contrário houve a preocupação de adoptar valores seguros, dentro das possibilidades construtivas actuais, acompanhando o estado actual da evolução técnica.

Vê-se também do quadro que a potência nominal de cada grupo de Cabora-Bassa é sensìvelmente dupla da potência total instalada na central de Bemposta. De facto a potência escolhida para cada grupo é pràticamente igual à soma das potências instaladas nas centrais de Bemposta e Picote, as duas maiores centrais da metrópole.

| Aproveitamento | Localização | Potência total (KW) | Potência cada grupo (KW) | N.º de grupos |
|---|---|---|---|---|
| BEMPOSTA | Portugal | 207 000 | 69 000 | 3 |
| CAMBAMBE | Portug. (ANG.) | 260 000 | 65 000 | 4 |
| KARIBA | Rodésia | 900 000 | 100 000 | 9 |
| ALCÂNTARA | Espanha | 984 000 | 246 000 | 4 |
| FURNAS | Brasil | 1 100 000 | 137 000 | 8 |
| MALPASO | México | 1 296 000 | 216 000 | 6 |
| MANI COUAGAN-5 | Canadá | 1 340 000 | 168 000 | 8 |
| TUMUT-3 | Austrália | 1 500 000 | 250 000 | 6 |
| CURI | Venezuela | 2 180 000 | 218 000 | 10 |
| *CABORA-BASSA* | *Portug. (MOÇ.)* | *3 600 000* | *400 000* | *9* |
| GRAND COULEE-3 | U. S. A. | 3 600 000 | 600 000 | 6 |
| BRASTSK | U. R. S. S. | 4 500 000 | 225 000 | 20 |
| CHURCHILL FALLS | Canadá | 4 500 000 | 450 000 | 10 |
| KRASNOYARSK | U. R. S. S. | 5 000 000 | 500 000 | 10 |

É pois natural considerar cada grupo produtor de energia, desde a comporta da tomada de água até ao barramento de entrada na subestação, onde o produtor entrega a energia ao transportador, como uma entidade autónoma, bastando-se a si própria e funcionando independente das restantes.

Para isso é mister que:

— o alternador forme bloco com o transfor-

mador, que eleva a tensão de produção para a tensão de entrega ao transportador, bloco esse que se prolonga através do restante equipamento de manobra até ligação ao barramento da subestação;

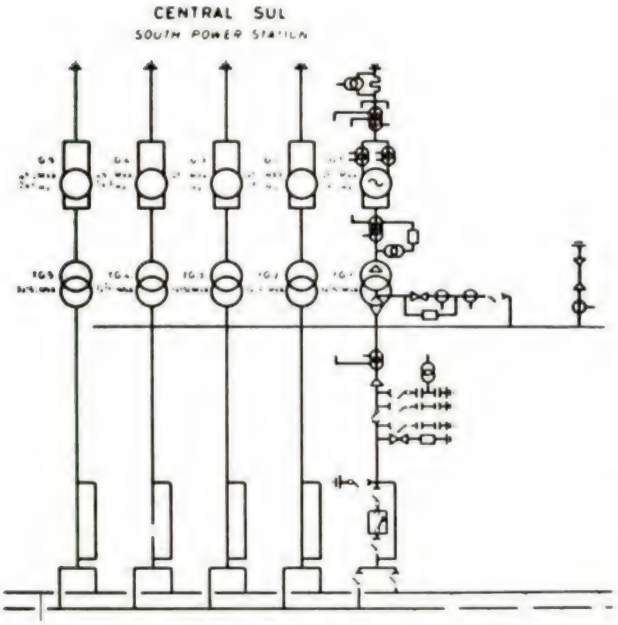



Fig. 6

— os órgãos de comando, sinalização, medida e protecção formem um conjunto completo e privativo de cada grupo;
— os serviços auxiliares de cada grupo sejam, quanto possível, independentes dos restantes.

Em grupos de tanta responsabilidade, as protecções terão de ser muito cuidadas e os serviços auxiliares adquirem importância especial.

A título de exemplo refere-se que o enrolamento do estator será provàvelmente de «fase dividida» ou «dupla estrela», não só porque a intensidade nominal da corrente por fase é da ordem de 13 kA, mas também para ser possível uma protecção diferencial transversal, além da longitudinal clássica nos alternadores de certa responsabilidade. Nos auxiliares próprios do grupo há que prever o possível arrefecimento por circulação forçada de água dos enrolamentos do estator e, eventualmente, também do rotor, o que obrigaria a montar, além de permutadores de calor e bombas de circulação, uma instalação de tratamento de água.

Admitir-se-ão os seguintes dados para poder concretizar valores nesta descrição:

| | |
|---|---|
| Potência aparente de alternador | 480 MVA |
| Factor potência . . . . . | 0,85 |
| Tensão de produção . . . . . | 20 kV |
| Tensão de entrega na subestação | 220 kV |

Julga-se inútil frizar que os blocos produtores terão constituição idêntica, para facilitar o treino do pessoal e diminuir as peças de reserva em armazém.

Por isso, e para maior maleabilidade da exploração, prevê-se fazer o paralelo de todos os grupos sobre o mesmo barramento. Esta solução tem o inconveniente de poder dar origem a intensidades de corrente muito elevadas em situação de curto-circuito. Admitindo que a soma da impedância transitória longitudinal do alternador com a tensão de curto-circuito do transformador é de 50 %, o poder de corte trifásico simétrico dos disjuntores, quando os 10 grupos estiverem em paralelo e a central funcionar isolada, terá de ser da ordem dos 10 000 MVA. Quando, num futuro mais distante, ela trabalhar interligada com outras centrais, em especial com as restantes do Zambeze, é de prever que esse poder de corte possa atingir valores vizinhos de 20 000 MVA, que está no limite das possibilidades de corte dos disjuntores pneumáticos actualmente fabricados para 220 kV.

Deve notar-se que, para melhorar as condições de corte dos disjuntores, se previu só um dos transformadores ter o neutro do secundário permanentemente ligado à terra. O dos restantes só será ligado à terra quando a tensão entre o respectivo ponto neutro e a terra ultrapassar o valor limite de segurança ou quando for de prever uma sobretensão de manobra.

A ligação dos neutros destes transformadores à terra faz-se através de um disjuntor ultra-rápido, actuado pelo comando de fecho ou de abertura do respectivo disjuntor principal, e de um explosor ligado em paralelo com o disjuntor ultra-rápido, regulado de acordo com o isolamento do neutro.

A localização dos órgãos do circuito principal cria alguns problemas que interessa referir.

O circuito hidráulico define a localização dos

alternadores, por eles estarem directamente acopulados às turbinas.

Como se prevê que os alternadores tenham, em ordem de grandeza, as seguintes dimensões:

Diâmetro total . . . . . ≃ 15 a 20 m
Altura total . . . . . ≃ 3 a 4 m

A forma mais económica de trazer a energia gerada para o exterior é abrir um poço vertical na vizinhança imediata da central; consegue-se assim o comprimento mínimo dos respectivos condutores. Este poço dará igualmente acesso do pessoal à central, através de uma escada e de um ascensor.

Fig. 7

reconheceu-se vantagem de dividir a instalação dos nove ou dez grupos por duas centrais, uma em cada margem.

A central sul, com cinco grupos instalados numa caverna escavada na rocha, a cerca de 150 m de profundidade, ficará pois com as dimensões de 22x180 m², reservando para átrio de montagem um módulo igual ao dos alternadores.

Na fig. 7 podem ver-se:

— a barragem com seus descarregadores;
— as tomadas de água da central sul e as da futura central norte, que não figura ainda no desenho;
— as condutas forçadas;
— as condutas de restituição, com as suas chaminés de equilíbrio;
— a estrada de acesso a estes locais e a galeria de acesso, em túnel, do equipamento pesado à central.

Localizou-se a sala de comando do aproveitamento junto à boca deste poço. Daí se pode comandar e fiscalizar toda a instalação com o mínimo comprimento de condutores, que não ultrapassam o comprimento com que é possível fazê-lo fio a fio, sem obrigar a sistemas de telecomando e teleinformação mais complexos.

Numa instalação desta natureza, o funcionamento deve ser automatizado ao máximo, limitando-se o pessoal da sala de comando a fiscalizar o seu funcionamento, o que não exclui a necessidade de comando manual em caso de avaria do sistema automático.

Podem instalar-se os transformadores numa caverna, paralela à da central e à distância mínima desta consentida pela construção civil.

Então as barras blindadas, construídas para a tensão nominal de 20 kV, que ligam os terminais do alternador aos do transformador são curtas (cerca de 20 m). Há que usar barras blindadas por duas razões:

1.º) porque a intensidade nominal por fase do alternador é da ordem dos 13 kA, o que obriga a usar condutores (barras de alumínio) com uma secção da ordem dos 25 000 mm².

2.º) para serem protegidas por um envólucro metálico contínuo, ligado à terra, para tornar mínima a probabilidade de um curto-circuito entre fases, que assim só é possível quando duas fases estiverem simultâneamente à terra. O diâmetro exterior das barras prevê-se ser da ordem de 1 m; o envólucro será estanque e no seu interior prevê-se uma atmosfera de preferência neutra (azoto), desumidificada e pressurizada.

Do secundário dos transformadores partem cabos unipolares de alta tensão, a 220 kV, com isolamento por óleo sob pressão, que sobem pela chaminé de cabos e transportam a energia para o exterior, onde ligam a uma linha aérea.

Esta solução, que é a mais económica, tem o inconveniente de poder dar origem a sobretensões nos terminais do transformador, onde a tensão pode, no caso limite, ser dupla da existente no outro extremo do cabo.

É pois de prever uma construção especial do transformador, com isolamento reforçado das primeiras espiras, ou, mais provàvelmente, adoptar cabos com características especiais e uma montagem adequada dos primeiros vãos da linha aérea, de forma a limitar a sobretensão.

Outra solução será a de colocar os transformadores no exterior e prolongar as barras pelo poço acima. É solução mais cara, que levanta sérios problemas de instalação, mas permite ligar os pára-raios directamente aos terminais de transformador, segundo a nossa técnica usual.

A localização ideal para a subestação seria junto ao edifício de comando e do poço de acesso à central, mas a topografia do terreno não se presta à instalação da subestação nesse local, como mostra a fig. 1.

Ai só seria possível uma subestação de encosta difícil e dispendiosa, pois o terreno é muito inclinado e irregular. Na fig. 8 vêem-se duas localizações possíveis, uma junto da futura albufeira (referenciada com o n.º 3) e outra no planalto, evidenciada pelo rectângulo a tracejado.

Um exame ao local revelou que a localização 3 obriga a uma subestação em degraus menos favorável do que parecia inicialmente, pelo que se admite, em alternativa, colocá-la no planalto, na região tracejada à cota aproximada da 800 m. Aí o terreno é mais plano o que permite não só a

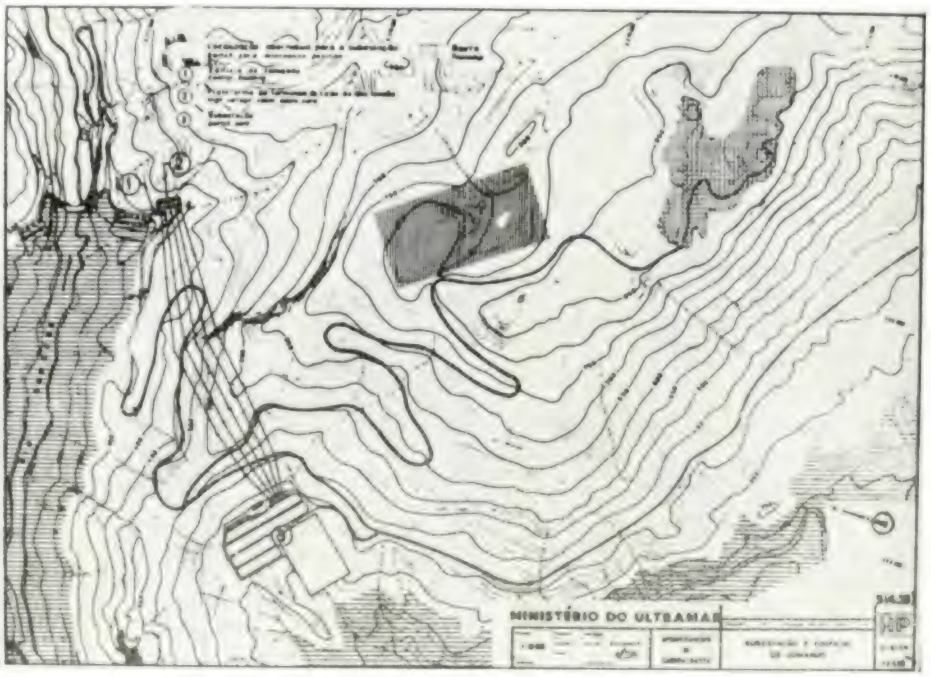



Fig. 8

instalação da subestação com menor volume de terraplanagem, como facilita eventuais ampliações.

Qualquer das localizações se encontra a cerca de 1,5 km do poço de acesso e do edifício de comando, o que obriga a construir uma linha aérea com esse comprimento e a criar uma plataforma onde se instale o equipamento necessário para a transição entre o cabo e a linha aérea. É solução muito mais económica do que prolongar o cabo de alta tensão ou as barras até à subestação.

A alimentação dos serviços auxiliares é o último problema que se vai referir.

Como não existe, num raio de algumas centenas de quilómetros, qualquer rede de distribuição que possa alimentar os serviços auxiliares de Cabora-Bassa há que fazê-la no próprio aproveitamento.

A solução clássica de uma derivação à tensão de produção no circuito principal não se afigura aconselhável, por demasiado insegura e perigosa, em máquinas de tão grande potência. A montagem de grupos turbina-alternador (uma central auxiliar em última análise, que se justificaria, além do mais, por se prever uma potência de 10 a 15 MW para os serviços auxiliares) seria dispendiosa e apresenta dificuldades na parte hidráulica.

Julga-se que o problema será resolvido com a montagem de um alternador na ponta do veio do grupo principal, destinado a alimentar os serviços auxiliares. A solução não é isenta de dificuldades, pois não se pode esquecer a necessidade de dispor de uma excitatriz, naturalmente também montada na ponta do mesmo veio e este não pode atingir comprimento excessivo.

Penso que será possível uma solução de compromisso, que conduza a um único alternador para os dois fins — excitação e serviços auxiliares próprios do grupo — pois que a corrente de excitação certamente se obterá a partir de tiristores, provàvelmente estáticos ou, possìvelmente, rotativos (montados sobre o rotor) para eliminar o sistema escovas-anéis. Os auxiliares gerais serão alimentados a partir do barramento a 220 kV ou dos terciários dos transformadores da estação rectificadora.

Para completar a ideia que se está tentando dar do aproveitamento de Cabora-Bassa, vê-se na fig. 9 um corte ao longo do circuito hidráulico de qualquer dos grupos.

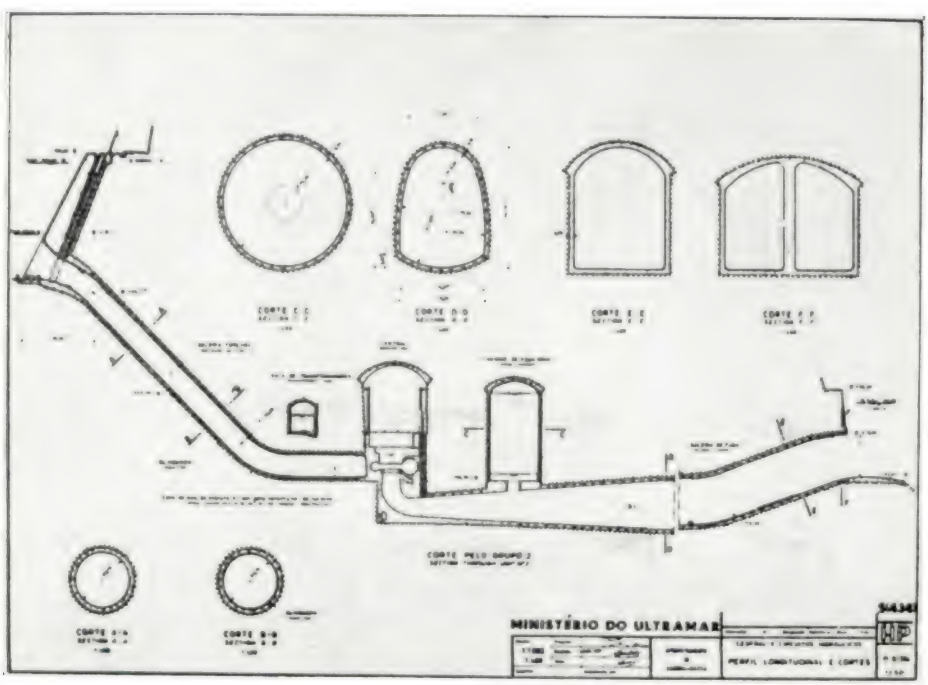



Fig. 9

A central obriga a escavar uma caverna com uns 70 m de altura.

O alternador deve ter um peso da ordem de:

| | |
|---|---|
| estator . . . . . | 500 T |
| rotor . . . . . | 1000 T |
| total . . . | 1500 T |

o que obrigará a montar duas pontes rolantes, gemináveis, previstas para a carga de 500 t cada uma, para poder levantar o rotor de uma só vez. Podem montar-se pontes de menor capacidade, mas então o rotor tem de ser desmantelado antes de ser retirado parcialmente, o que torna mais morosas as revisões e reparações.

No piso principal, com um pé direito de cerca de 30 m, instalar-se-ão os quadros unitários dos grupos, que permitem o seu comando local, e os quadros dos serviços auxiliares.

A conduta forçada tem um diâmetro de 9,70 m o que obrigou a suprimir a válvula junto à turbina e a colocar duas comportas, uma de manobra e fecho rápido e outra de segurança e emergência. A jusante da turbina existe outra comporta para isolar o grupo, comandada de dentro da central.

A chaminé de equilíbrio tem um diâmetro de 22 m.

À esquerda da central vê-se a caverna dos transformadores. O poço de cabos, que não está representado, parte do topo desta caverna.

---

## II SEMANA DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

Por lapso, no artigo «Microelectrónica. Circuitos integrados. Semicondutores», publicado na *Técnica* n.º 375, de Fevereiro de 1968, indicou-se como tendo tido lugar em Fevereiro a II Semana de Engenharia Electrotécnica. Na realidade esta manifestação ocorreu entre 15 e 20 de Janeiro de 1968.

# NOTICIÁRIO

## Comemorações do centenário de Osborne Reynolds — Simpósio

A Universidade de Manchester vai celebrar o centenário da nomeação de Osborne Reynolds para a regência da Cadeira de Engenharia, em 1868, com a realização de um Simpósio, de 9 a 11 de Setembro de 1968, nos Laboratórios «Simon Engineering» da Universidade.

O Simpósio abre com uma conferência sobre «A Vida e o Trabalho de Osborne Reynolds». As três sessões seguintes são dedicadas à turbulência, à transmissão do calor e aos modelos hidráulicos. A sessão final do Simpósio terá a forma de um «Forum» livre no qual os oradores convidados discutirão os pontos levantados por outros membros do Simpósio. Outras actividades incluem visitas a vários laboratórios hidráulicos e de transmissão do calor da Universidade de Manchester, e à «Exposição Osborne Reynolds».

As entidades interessadas nas celebrações podem contactar com o Secretário do Simpósio, J. D. Jackson, Osborne Reynolds Centenary, Simon Engineering Laboratories, The University, Manchester 13 (England).

## Colóquio Internacional Rilem sobre durabilidade dos betões

Terá lugar em Praga, de 2 a 5 de Setembro de 1969. Do programa preliminar constam:

1. Questões fundamentais, princípios e métodos de ensaio e de determinação da durabilidade dos betões.

2. Corrosão das armaduras e sua prevenção.

Informações: Stavební ústavcvut

Solínova 7 — Praha 6 — Djevice — Checoslováquia.

## IV Quinzena Técnica de Paris

De 16 de Maio a 3 de Junho de 1968, terá lugar em Paris a IV Quinzena Técnica.

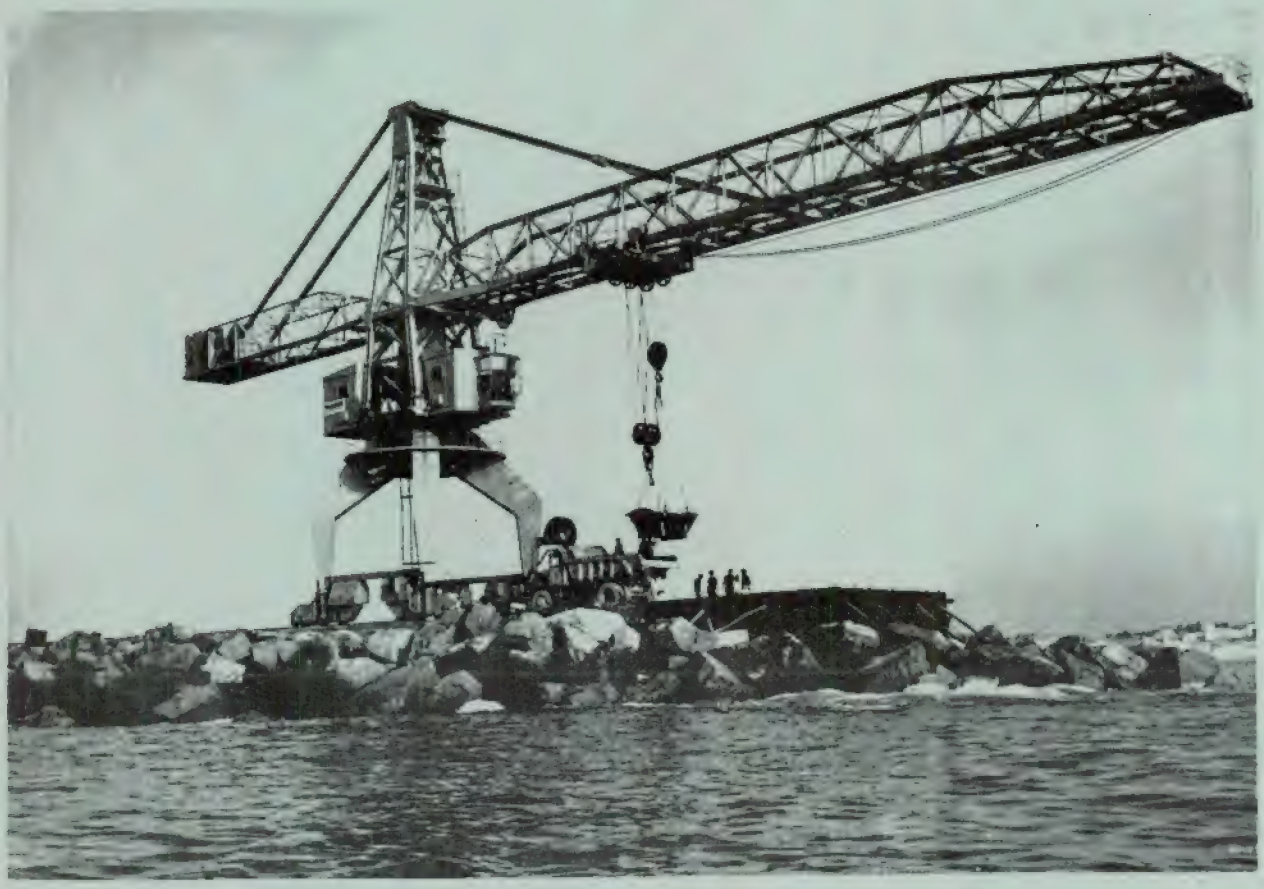
A «Quinzena Técnica» é uma manifestação de vocação múltipla: apresentar, comprar e vender. De dois em dois anos, em Paris, a «Quinzena Técnica» reune durante o mês de Maio um certo número de certames especializados e a feira de Paris. Oferece-se assim ao visitante a possibilidade, sem multiplicar as deslocações, de verificar pessoalmente o estado de adiantamento de várias técnicas susceptíveis de interessar a sua profissão:

— Expomat (6.º Salão)
— 8.º Salão internacional de química
— Bienal do equipamento eléctrico
— Europain (2.º certame)
— 57.ª Feira de Paris

Informações:

Quinzaine Technique de Paris
49, rue de Tocqueville
Paris XVII eme — France

# MAGUE



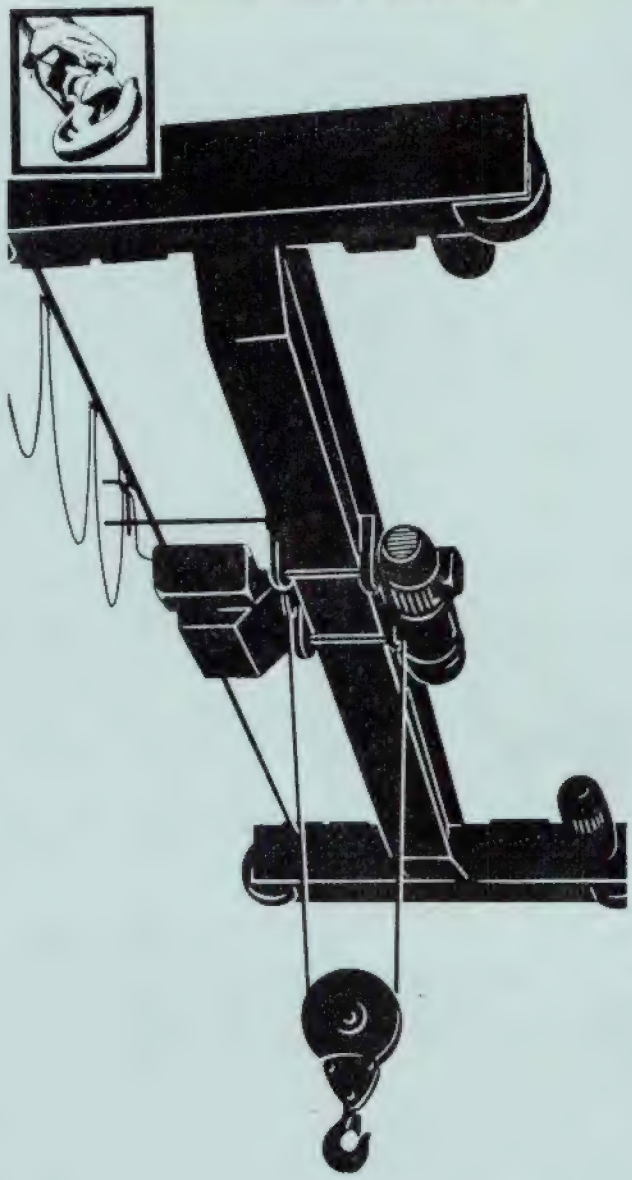
GUINDASTE ELÉCTRICO DE 50 t/ 16 m - 25 t/ 30 m EM SERVIÇO NAS OBRAS DE MELHORAMENTO DO PORTO DA PÓVOA DO VARZIM.

| | |
|---|---|
| PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS | *Projecto e fabrico* |
| TURBINAS HIDRÁULICAS | *Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.* |
| TURBINAS A VAPOR | *Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.* |
| CALDEIRAS A VAPOR | *Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.* |
| EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS | |

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L.

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

**DEMAG** EQUIPA TODA A INDUSTRIA



## Pontes rolantes fabricadas em cadeia . . .

As pontes rolantes Standard são fabricadas em série, nos tipos monoviga e biviga, pelo sistema de combinação de peças normalizadas.
Para vãos até 28 m e capacidades de carga de 250 kg a 20.000 kg permitem a adaptação às vossas condições de trabalho.

Reduzido peso próprio, pequena altura de construção, prazos de entrega rápidos, preços excepcionalmente baixos, eis as vantagens das pontes rolantes standard «Demag»:
Consulte-nos e os nossos engenheiros efectuarão o estudo do seu problema gratuitamente.
Assistência exemplar - O vosso sucesso será também o nosso.

ROMAR — ORGANIZAÇÃO AO SERVIÇO DA INDÚSTRIA

**SOCIEDADE COMERCIAL ROMAR, LDA.**

LISBOA – TRAVESSA DA GALÉ, Nº 9 TEL. 635670 / 634061 • PORTO – R DE SA DABANDEIRA, Nº 589/603 TEL. 25871/32205

C. D. U. 681.14 : 621.3

# INTRODUÇÃO AO CÁLCULO ANALÓGICO (*)

por CARLOS DE MEDEIROS PORTELA
Doutor em Engenharia Electrotécnica
Chefe do Centro de Cálculo da
Companhia Nacional de Electricidade

RESUMO

*Neste artigo faz-se uma introdução ao cálculo analógico, sendo referidos, designadamente, os seguintes aspectos:*

- *Circuitos lineares de parâmetros concentrados*
- *Circuitos não lineares de parâmetros concentrados*
- *Circuitos de parâmetros distribuidos*
- *Circuitos com relações algébricas num domínio complexo*
- *Calculadores operacionais*
- *Métodos de aplicação de calculadores analógicos.*

SYNOPSIS

*This paper deals with an introduction to analogic computation, being refered, namely, the following subjects:*

- *Linear circuits with concentrated parameters*
- *Non linear circuits with concentrated parameters*
- *Circuits of distributed parameters*
- *Circuits with algebraic relations in a complex domain*
- *Operational computers*
- *Analogic computers applications methods.*

## 0. — INTRODUÇÃO

Dentro da concepção de Platão, a realidade metafísica é constituída pelas ideias. Dessa realidade, o homem, na caverna em que habita, apenas vê sombras que toma por realidade, mas que são apenas projecções incompletas das ideias de que indirectamente tem percepção.

Os calculadores são um exemplo nítido da profundidade da alegoria da caverna, quer quanto a uma estrutura lógica dos calculadores, quer quanto às relações entre os sistemas matemáticos ou físicos que se pretende estudar e à sua representação ou simulação por calculadores.

Há várias formulações extraordinàriamente elegantes e úteis da teoria de circuitos e calculadores que levam o homem a extasiar-se com a sua aparente capacidade de dominar as ideias — é o caso das formulações do tipo das desenvolvidas por Kron, Bode, Wiener e Katzenelson. Mas, reflectindo um pouco, é fácil apercebermo-nos de que esse domínio se limita apenas a sombras das ideias e que as ideias em si são muito mais poderosas que as sombras e continuam por dominar.

É uma fatalidade da condição humana, traduzida na Odisseia de Ulisses e na sua tenaz procura, simultânea com a sua recusa de acesso ao Olimpo.

Bàsicamente, calculador analógico é qualquer sistema físico em que as grandezas que o caracterizam têm correspondência com grandezas de um sistema, matemático, físico, económico, ou de outra natureza, que se pretende estudar.

Esta definição é extremamente geral e engloba uma extraordinária variedade de sistemas, incluindo os tipos mais frequentes de calculadores, entre eles os vulgarmente designados por numéricos, e quase se confunde com a metodologia científica.

É fácil ver, no entanto, que definições mais restritivas eliminam tipos de calculadores úteis ou utilizáveis. Mas, para ser realista, há que não pretender abarcar simultâneamente toda a realidade e contentarmo-nos com sombras parciais. Mas não esquecendo que são apenas facetas de uma realidade mais vasta e não se confundindo com essa realidade.

A Comissão Electrotécnica Internacional propõe a seguinte definição de *simulador*:

> Calculador (geralmente analógico) concebido de maneira a realizar uma correspondência directa entre os elementos e as

(*) A matéria deste artigo constituiu objecto de uma palestra proferida no Instituto Superior Técnico, em Abril de 1967, por amável convite do Sr. Prof. António Gouvêa Portela.

ligações do sistema estudado por um lado, e os elementos e ligações do simulador por outro lado.

Apesar da aparente generalidade, esta definição é também injustificadamente restritiva.

O que há de essencial no cálculo analógico é estudar uma *sombra* de uma ideia através de outra *sombra* da mesma ideia.

Os primeiros calculadores foram mecânicos. Verificou-se posteriormente uma concentração em calculadores eléctricos, por vezes com alguns elementos electromecânicos, motivada fundamentalmente por:

- Desenvolvimento tecnológico da electrotecnia, que permitiu obter elementos unitários, com características de qualidade utilizáveis em calculadores, a preços baixos.
- Facilidade de obtenção de elementos unitários dentro de uma larga gama de variação de parâmetros.
- Independência dos fenómenos electromagnéticos do campo de gravidade.

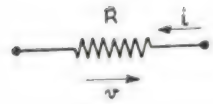
Convém acentuar que esta escolha das grandezas electromagnéticas para os calculadores resulta, fundamentalmente, de razões tecnológicas e técnico-económicas e não de uma necessidade absoluta, e que, por outro lado, não tem consequências fundamentais sob o ponto de vista teórico ou conceptual.

Começo por passar em revista alguns dos aspectos essenciais da teoria dos circuitos eléctricos, que tem muito de comum com a teoria dos calculadores e é básica no caso de «análogos» constituídos por circuitos eléctricos.

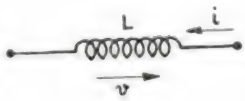
## 1. — O CIRCUITO LINEAR DE PARÂMETROS CONCENTRADOS

Um circuito linear passivo é constituído pela associação de resistências, induções (próprias e mútuas) e capacidades.

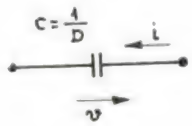
Não considerando, para mera simplicidade de exposição, as induções mútuas, têm-se as relações indicadas na fig. 1 entre a tensão entre terminais e corrente aos terminais destes circuitos, representando por p a derivação em relação ao tempo $\left(p = \frac{d}{dt}\right)$ e por $\frac{1}{p}$ a integração em relação ao tempo.




$v = Ri$




$v = \frac{d}{dt}(Li) = pLi$




$i = \frac{d}{dt}(Cv)$

$i = pCv$

$v = \frac{1}{p} Di$

Fig. 1

Considere-se um circuito constituído por elementos deste tipo, no qual estejam inseridas f. e. m., e a formulação do tipo da equação das malhas de Maxwell (fig. 2).

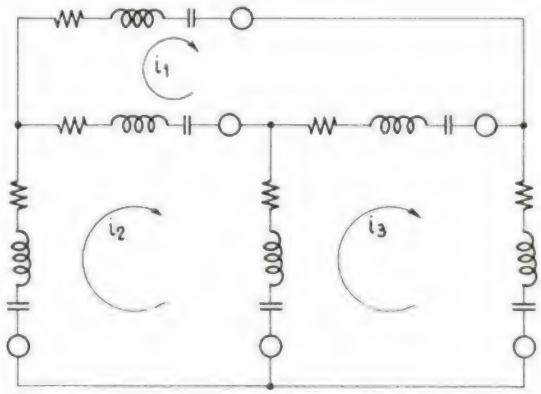



Fig. 2

Chega-se a um conjunto de relações do tipo

$$1.1)\quad \begin{cases} Z_{11}\, i_1 + Z_{12}\, i_2 + \ldots + Z_{1n}\, i_n = e_1 \\ Z_{21}\, i_1 + Z_{22}\, i_2 + \ldots + Z_{2n}\, i_n = e_2 \\ \qquad \ldots \\ Z_{n1}\, i_1 + Z_{n2}\, i_2 + \ldots + Z_{nn}\, i_n = e_n, \end{cases}$$

ou

$$1.2)\quad \| Z_{ij} \| \; \| i_j \| = \| e_i \| ,$$

sendo

$$1.3)\quad Z_{ij} = pL_{ij} + R_{ij} + \frac{1}{p} D_{ij}$$

e representando

$Z_{ii}$ a impedância própria da malha i, soma das impedâncias de todos os elementos ao longo da malha i;

$Z_{ij} = Z_{ji}$ a impedância mútua entre as malhas i e j, soma das impedâncias nos ramos comuns às malhas i e j, afectadas do sinal negativo se os sentidos positivos de $i_i$ e $j_j$, são opostos nesses ramos.

Consideremos um elemento activo em regime linear, ligado nas malhas j e k, que pode ser representado por um esquema equivalente do tipo indicado na fig. 3.

Surge assim um termo assimétrico na interacção entre as malhas j e k, traduzido na malha k por uma f. e. m. $-\mu Z_g i_j$ ou por uma impedância mútua $\mu Z_g i_j$.

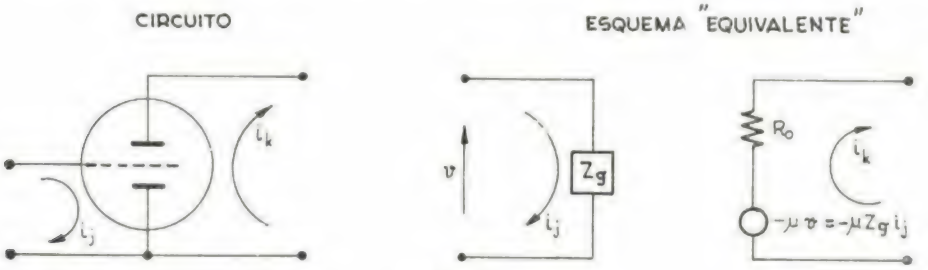



Fig. 3

Portanto, num circuito linear com elementos activos, continua a ser válido um sistema de equações do tipo 1.1), mas deixa de ser, em geral, válida a simetria das impedâncias mútuas.

Há uma formulação dual do sistema, baseada em admitâncias entre nós em vez de impedâncias, em correntes injectadas nos nós em vez de f. e. m. inseridas nas malhas, e em tensões entre os nós e um nó de referência em vez de correntes nas malhas. Chega-se a um sistema de equações:

1.4) $$\| Y_{ij} \| \quad \| v_j \| = \| i_i \| .$$

Além das duas formulações referidas, podem, naturalmente, considerar-se outras. Dado o ponto de vista conceptual e introdutório desta exposição, no entanto, não as refiro aqui.

É possível definir um conjunto de relações, com certa semelhança formal, designadamente:

— impedância de transferência entre a f. e. m. $e_j$ na malha j e a corrente $i_k$ na malha k, na ausência de outras f. e. m.,

1.5) $$Z_T = \frac{e_j}{i_k} = \frac{\Delta}{\Delta_{jk}} ,$$

sendo $\Delta$ o determinante da matriz Z, e $\Delta_{jk}$ o menor jk desse determinante;

— admitância de transferência entre a corrente aplicada ao nó j e a tensão do nó k,

1.6) $$Y_T = \frac{i_j}{v_k} = \frac{\Delta'}{\Delta'_{jk}} ,$$

sendo $\Delta'$ o determinante da matriz Y e $\Delta_{jk}$ o menor jk desse determinante.

Tem-se assim uma formulação do comportamento do circuito de tipo algébrico, considerando p uma variável. A validade desta representação algébrica, que não vou analisar, baseia-se no fundo numa transformação do tipo de transformação de Laplace [1], que:

— converte o domínio de funções de uma variável t num domínio de funções de uma variável complexa p;

— converte as relações de integração no donio de t em relações de divisão por p no domínio das funções de p;

— converte as relações de derivação no donínio t, em relações de multiplicação por p no domínio das funções de p, e adição de parcelas correspondentes a condições iniciais.

As parcelas correspondentes a condições iniciais na transformação de Laplace estão associadas à consideração de funções nulas para $t < t_0$. Em alternativa à consideração dessa origem finita,

[1] Lembra-se que a transformada de Laplace $\mathcal{L}[f(t)]$ de uma função f (t) é uma função da variável p, podendo ser definida por

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(p) = \int_0^{\infty} f(t)\, e^{-pt}\, dt$$

é por vezes viável admitir um desenvolvimento em integral de funções com origem para $t = -T$, com $-T \rightarrow -\infty$, de forma que, em sistemas estáveis, os regimes transitórios se tenham tornado desprezáveis.

Dada a linearidade, qualquer excitação externa do sistema pode ser decomposta num conjunto de excitações sinusoidais, decompondo-a em integral de Fourier.

Um valor particular da variável complexa p traduz a resposta do sistema a uma exitação da forma:

1.7 $$x = A\, e^{pt} \quad ,$$

ou, sendo

1.8) $$p = j\omega \quad ,$$

1.9) $$x = A\, e^{j\omega} \quad .$$

Para

1.10) $$p = \alpha + j\beta \quad ,$$

com $\alpha$ e $\beta$ reais, tem-se

1.11) $$x = A\, e^{\alpha t}\, e^{j\beta t} \quad .$$

Tem-se assim que:

$\alpha$ traduz um crescimento da função no tempo, para $\alpha > o$, e um decrescimento, para $\alpha < o$.

$\beta$ traduz uma oscilação de pulsação $\beta$.

Qualquer função de circuito, W, é traduzida pelo cociente de dois polinómios em p e portanto, àparte um factor de multiplicação constante, é completamente definida pelos seus zeros e pólos no domínio da variável p (fig.4).

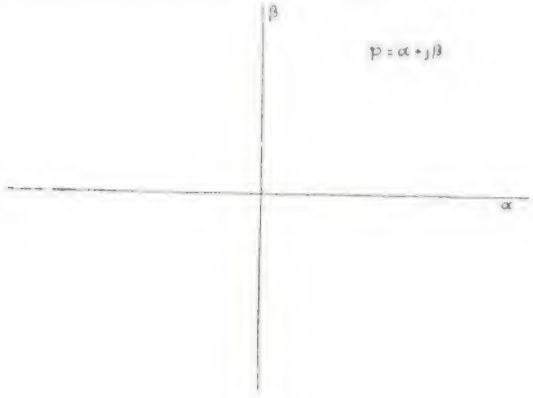



Fig. 4

O comportamento do circuito fica pois definido por um conjunto de valores de zeros e pólos.

Os coeficientes de p nas funções de circuito são reais. Segue-se que, substituindo p pelo seu conjugado, a função de circuito toma também um valor conjugado. Portanto, uma função de um circuito realizável tem valores conjugados em pontos conjugados do plano p ou, o que é o mesmo:

1 — Os zeros e pólos de uma função de circuito que não sejam reais ocorrem em pares conjugados.

2 — As componentes reais e imaginárias de uma função de circuito no eixo das frequências reais têm respectivamente simetria par e ímpar em relação à origem.

Os valores de p correspondentes ao regime livre de um circuito são traduzidos pelos zeros do determinante $\Delta$.

Portanto, num sistema estável os zeros de $\Delta$ não podem existir na metade direita do plano da variável p.

Há um conjunto de condições complementares quanto à localização de zeros e pólos de algumas funções de circuito (não análogas para todas).

Um conjunto de condições deste tipo, mais restrito, pode ser estabelecido para as funções de circuitos passivos.

Por exemplo:

1 — Os zeros e pólos de uma impedância ou admitância própria ($j = k$) de um circuito passivo não podem existir na metade direita do plano p.

2 — A parte real da impedância ou admitância própria não pode ser negativa para frequências reais.

## 2. — CIRCUITOS NÃO LINEARES DE PARÂMETROS CONCENTRADOS

Num circuito não linear de parâmetros concentrados têm-se, designadamente, os seguintes tipos de elementos:

1 — *Resistência*

Trata-se de um dipolo caracterizado por uma relação do tipo (fig. 5):

2.1) $f^t(v, i) = 0,$

sendo v a tensão, i a corrente a $f_t$ uma relação, em geral dependente do tempo, entre as duas variáveis a que, além do tempo, se aplica.

Se, para uma relação deste tipo, e em cada instante, a corrente define unìvocamente a tensão, tem-se uma resistência «controlada por corrente» (fig. 5a), e no caso de a tensão definir unìvocamente a corrente, uma resistência «controlada por tensão» (fig. 5b). No caso geral (fig. 5c) o circuito poderá não satisfazer a uma destas duas condições.

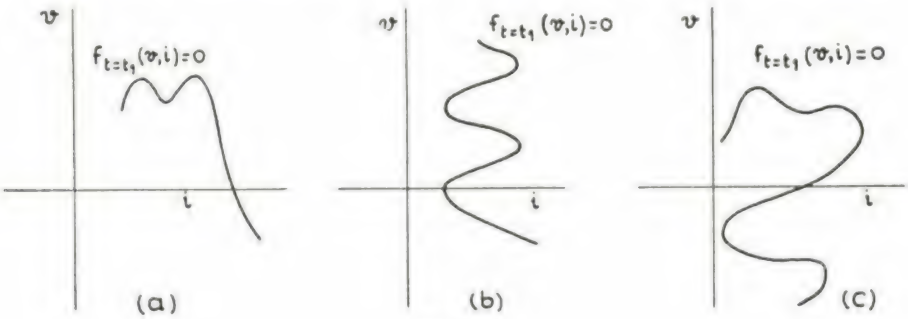



Fig. 5

2 — *Indução própria*

Trata-se de um dipolo ou elemento dipolar (ou parte fictícia de um dipolo) de um circuito, caracterizado por relações do tipo:

2.2) $f_t(\phi, i) = o$

2.3) $v = \dfrac{d\phi}{dt},$

sendo v a tensão, i a corrente, $\phi$ o fluxo do vector indução magnética.

Se, para uma relação deste tipo e em cada instante, a corrente definir unìvocamente o fluxo, tem-se uma indução própria «controlada por corrente», e, se o fluxo definir unìvocamente a corrente, a indução própria diz-se «controlada por fluxo».

3 — *Indução mútua*

Trata-se de uma relação entre a corrente num elemento, o fluxo do vector indução magnética no circuito correspondente a outro elemento e a tensão entre dois terminais correspondentes, de definição análoga à indução própria.

4 — *Capacidade*

Trata-se de um circuito dipolar caracterizado por

2.4) $f_t(q, v) = 0$

2.5) $i = \dfrac{dq}{dt},$

sendo q a carga, v a tensão, i a corrente.

No caso de, em cada instante, a carga definir unìvocamente a tensão, o circuito diz-se controlado pela carga, e no caso de a tensão definir unìvocamente a carga, controlado por tensão.

5 — *Fonte de tensão*

Trata-se de um circuito dipolar caracterizado por uma relação do tipo

2.6) $v = f_t(x_t),$

sendo $x_t$ uma função de grandezas do circuito, função eventualmente dependente do tempo (correntes, tensões, fluxos do vector indução magnética, cargas de condensadores).

6 — *Fonte de corrente*

Trata-se de um circuito dipolar caracterizado por uma relação do tipo

2.7) $i = f_t(x_t).$

7 — *Fonte mista*

Trata-se de um circuito dipolar do tipo

2.8) $F_t(v, i) = f_t(x_t),$

sendo $F_t$ uma relação eventualmente dependente do tempo.

É possível estabelecer conjuntos de condições com razoável generalidade tais que, se satisfeitas, existe uma grandeza S, vector de n componentes, designada por vector de estado (1), tal que

2.9) $$\dot{S} = f_t\,(S,t)\ ,$$

sendo $\dot{S}$ a derivada de S em relação ao tempo.

Esta importante relação permite, a partir do conhecimento de S num dado instante, obter o vector de estado em qualquer outro instante, por integração, pois

2.10) $$S\,(t + dt) = S\,(t) + \dot{S}\,dt\ .$$

Alguns dos conjuntos de condições necessárias para existência de uma função de estado baseiam-se na verificação de dois tipos de circunstâncias :

1) — Serem satisfeitas determinadas condições topológicas nas ligações entre elementos dos circuitos.
2) — As relações funcionais do tipo $f_t$, que definem os elementos dos circuitos, satisfazerem a determinadas condições do tipo das condições de Lipschitz (2).

Para alguns tipos de condições, é possível estabelecer, de forma dedutiva e genérica, um processo de determinação da função de estado no instante $t + dt$ a partir do seu conhecimento no instante t, e, portanto, definir a evolução das grandezas de circuito no tempo a partir das condições iniciais.

(1) — Nalguns casos, as componentes do vector de estado podem ser constituídas pelos fluxos (ou correntes) nas induções e pelas cargas (ou tensões) nas capacidades.

(2) — Seja uma função f (x, y) num domínio D de x e y, sendo $z$ um valor de y deste domínio. A função satisfará a condição de Lipschitz no domínio D se for possível definir um número M, finito e independente de y e $z$, tal que

$$|f\,(x,y) - f\,(x,z)| \leq M\,|y - z|\ .$$

Sob uma forma intuitiva, embora não rigorosa, a condição de Lipschitz traduz uma continuidade e «inclinação limitada» da função, sendo embora mais geral que a condição de derivabilidade.

Sairia do âmbito desta exposição uma análise mais detalhada do problema.

Os circuitos não lineares de parâmetros concentrados são utilizados nos calculadores para representação de relações não lineares.

Em relações funcionais, um dos elementos mais simples é constituído pelo diodo, caracterizado idealmente por uma relação tensão-corrente do tipo indicado na fig. 6.

Fig. 6

Associado a resistências lineares e eventualmente a amplificadores, o diodo permite obter, à custa de número de elementos, relações funcionais entre duas ou mais variáveis, embora em geral sem grande precisão.

Por exemplo, é possível obter relações da forma

2.11) $$y = a\,x^n$$

2.12) $$y = a \cos x$$

2.13) $$y = a\,e^x\ .$$

Compondo elementos deste tipo com circuitos com amplificadores, é também possível obter relações funcionais entre três variáveis, do tipo :

2.14) $$z = z\,(x, y)\ .$$

Uma relação de particular interesse é o produto

2.15) $$z = a\,.\,x\,.\,y\ .$$

Alguns elementos têm uma relação tensão-corrente diferente da de proporcionalidade, o que pode permitir obter uma relação

2.16) $$y = y\,(x)$$

conveniente, quer directamente, quer por associação com resistências lineares para adaptação de características.

Um caso muito simples é constituído pelas lâmpadas de filamento de tungsténio em que,

por efeito de variação de temperatura com a corrente, se tem, para variações lentas,

2.17) $$v \simeq c\, i^{1,85}.$$

Em relações, tipo derivada e integral de uma função não linear, um circuito típico é constituído por uma indução com ferro, em que, idealmente, se tem, em caso de histerese desprezável, uma relação do tipo indicado na fig. 7.

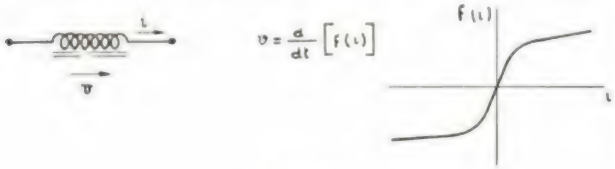



Fig. 7

Em casos com histerese acentuada, tem-se uma relação do tipo da fig. 8.

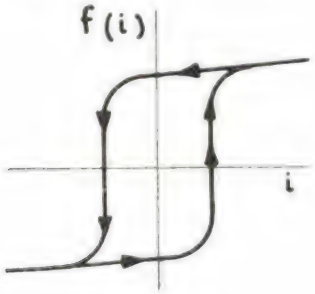



Fig. 8

A histerese pode ser aproveitada para «memorizar» uma situação anterior. É este o processo mais utilizado para conservar em «memória» sinais que podem ser interpretados como «algarismos» nos calculadores numéricos.

## 3. — CIRCUITOS DE PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS

Os circuitos de parâmetros distribuídos constituem a base de um ramo do cálculo analógico.

A expansão directa deu-se primeiro na resolução de equações do tipo

3.1) $$\text{lap}\ \phi = 0,$$

equação a que satisfaz o campo eléctrico num meio isótropo uniforme sem fontes interiores de corrente ou tensão.

Usam-se modelos contínuos, por exemplo de um electrólito, papel condutor, etc..

Na fig. 9 representa-se um caso particularmente simples, correspondente à satisfação da equação 3.1 num domínio D, sendo impostos os valores de $\phi$, $\phi_1$ na zona 1 da fronteira, $\phi_2$ na zona 3, e a condição de a componente de grad $\phi$ ortogonal à fronteira nas zonas 2 e 4 da fronteira ser nula.

Se, com papel condutor, se delimitar um domínio D' de forma correspondente, por semelhança, à de D, com tinta "muito condutora" (1) se "desenhar", dando continuidade, dois eléctrodos correspondentes às zonas 1 e 3 da fronteira, se aplicar entre estes elécrodos uma tensão $V_1 - V_2$, tem-se satisfeita, no domínio D', a condição análoga a 3.1, no que respeita ao potencial eléctrico, e têm-se nas zonas 1, 2, 3, e 4 de D' condições análogas às condições na fronteira de D. Por medição do potencial eléctrico em D', o que pode ser feito com facilidade, obtém-se a função $\phi$, que pode ser visualizada, por exemplo, traçando uma família de equipotenciais.

Este tipo de utilização generalizou-se a vários outros tipos de relações, designadamente para ter em conta anisotropia, discontinuidades, fontes internas de energia, processos de difusão, cobrindo uma vasta gama de utilizações na resolução de equações diferenciais, designadamente dos seguintes tipos:

3.1) $\text{lap}\ \phi = 0$ (de Laplace)

3.2) $\text{lap}\ \phi = \dfrac{K\, \partial \phi}{\partial t}$ (difusão)

3.3) $\text{lap}\ \phi = \dfrac{K\, \partial^2 \phi}{\partial t^2}$ (propagação)

3.4) $\text{lap}\ \phi = K_1 \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + K_2 \dfrac{\partial \phi}{\partial t} + K_3 \phi$ (propagação com atenuação)

3.5) $\text{lap}\ \phi = K_1 \dfrac{\partial \phi}{\partial t} + (K_2, \text{grad}\ \phi)$ (difusão com translação)

3.6) $\text{lap}\ \phi = -K\, \Psi$ (Poisson)

3.7) $\text{lap lap}\ \phi = K\phi$ (elasticidade estática)

3.8) $\text{lap lap}\ \phi = K \dfrac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$ (elasticidade dinâmica),

(1) O sentido de "muito condutora" é, naturalmente, o facto de a condutividade superficial da zona do papel condutor a que é aplicada a tinta ser muito superior à do resto do papel, podendo considerar se equipotencial uma superfície contínua a que tenha sido aplicada tinta condutora.

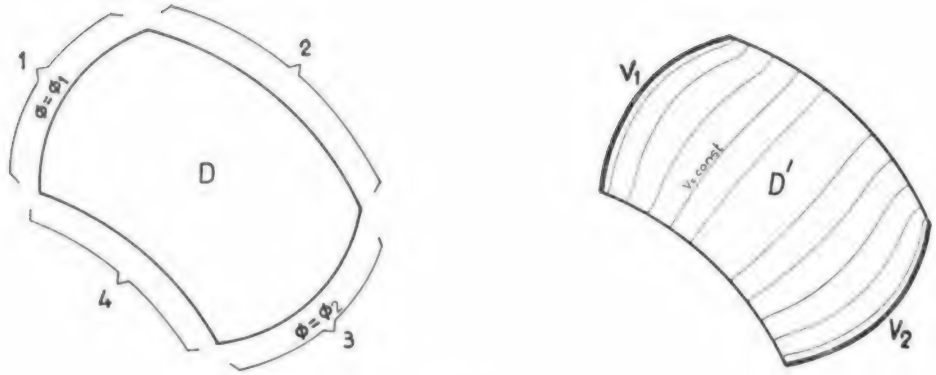



Fig. 9

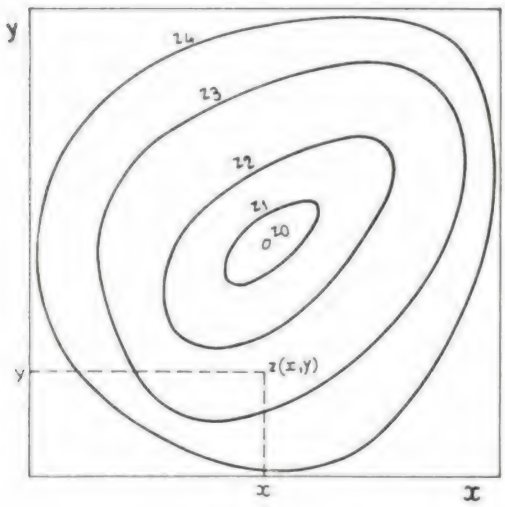



Fig. 10

e a generalização destas equações a meios de parâmetros função de ponto ou variando no tempo, anisótropos e com discontinuidades.

Entre outras utilizações de circuitos de parâmetros distribuídos em calculadores, cito a representação de relações funcionais complexas e empíricas a duas variáveis,

3.9) $$z = f\,(x, y)\,.$$

Seja, por exemplo, o caso de representação de um diagrama em colina obtido empìricamente. Traçando em papel condutor, com tinta «muito condutora», linhas correspondentes a valores particulares da função que se pretenda representar (fig. 10), e aplicando a essas «linhas» potenciais correspondentes, tem-se, entre duas linhas, uma «interpolação» da função em causa.

Se uma ponta condutora for aplicada ao papel e se as suas coordenadas x e y forem comandadas por servomecanismo, de maneira a corresponderem aos valores de x e y, o potencial na ponta condutora corresponderá ao valor de z.

## 4. — CIRCUITOS COM RELAÇÕES ALGÉBRICAS NUM DOMÍNIO COMPLEXO

Em regime alternado sinusoidal de pulsação $\omega = 2\pi f$, com notação complexa, têm-se as relações entre os vectores ou complexos representativos de tensões e correntes indicadas na fig. 11.

Em circuitos com elementos activos, é ainda possível simular relações correspondentes e resistências negativas.

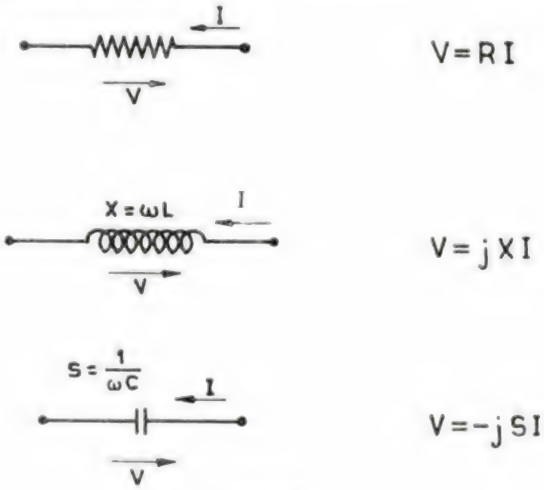



Fig. 11

Associando circuitos deste tipo, podem-se simular relações algébricas lineares de coeficientes complexos entre variáveis tipo V e tipo I.

No caso de relações algébricas reais, de coeficientes positivos e negativos, basta considerar apenas circuitos L e C e abstrair do parâmetro

j nas relações entre as diferentes tensões ou entre as diferentes correntes (não simultâneamente entre ambas).

## 5. — CALCULADOR OPERACIONAL

### 5.0 — Introdução

Um dos tipos mais generalizados de calculadores analógicos é constituído pelos designados por calculadores operacionais. Por esse motivo, passam a analisar-se alguns dos elementos mais frequentes neste tipo de calculadores.

### 5.1 — Circuitos típicos utilizando amplificadores

Num calculador operacional típico as operações unitárias são desempenhadas por circuitos elementares associados em geral a um amplicafidor operacional, de ganho muito elevado, grande impedância de entrada e pequena impedância de saída.

Normalmente, as grandezas em causa são representadas por tensões em relação a um terminal de referência, que por esse facto é normalmente omitido da representação.

Considere-se o circuito indicado na fig. 12, sendo N o ponto de referência de todas as tensões e $Z(p), \ldots, Z_n(p)$, impedâncias de transferência de circuitos de três terminais entre a tensão de entrada e a corrente de saída, com tensão de saída nula, expressa em função de p, e $Z_0(p)$ a impedância de transferência do circuito de três terminais entre a tensão de saída e a corrente de entrada, com tensão de entrada nula.

Na medida em que K se possa considerar muito elevado, sendo $v_0$ finita, v é muito reduzida e pode, em primeira aproximação, supor-se desprezável. Por outro lado, sendo elevada a impedância de entrada do amplificador e v reduzida, i' pode supor-se muito pequena.

Dentro das aproximações anteriores, ter-se-á :

5.1) $$-i_0 = i_1 + i_2 + \ldots + i_n \quad ,$$

ou

5.2 $$v_0 = -Z_0(p)\left[\frac{v_1}{Z_1(p)} + \frac{v_2}{Z_2(p)} + \ldots + \frac{v_n}{Z_n(p)}\right].$$

Esta representação pode considerar-se meramente simbólica, com o significado definido atrás para p e $\frac{1}{p}$, ou válida para as transformadas de Laplace das variáveis v, com as modificações eventualmente resultantes das condições iniciais ou anteriores ao início do período de análise, se elas não forem consideradas nulas ou extintas.

Como se verifica fàcilmente, dada a razoável latitude com que é possível, com associação simples de elementos, obter funções $Z_0, Z_1, Z_2, \ldots, Z_n$, este elemento unitário do calculador tem bastante maleabilidade. Na fig. 13 indicam-se alguns exemplos.

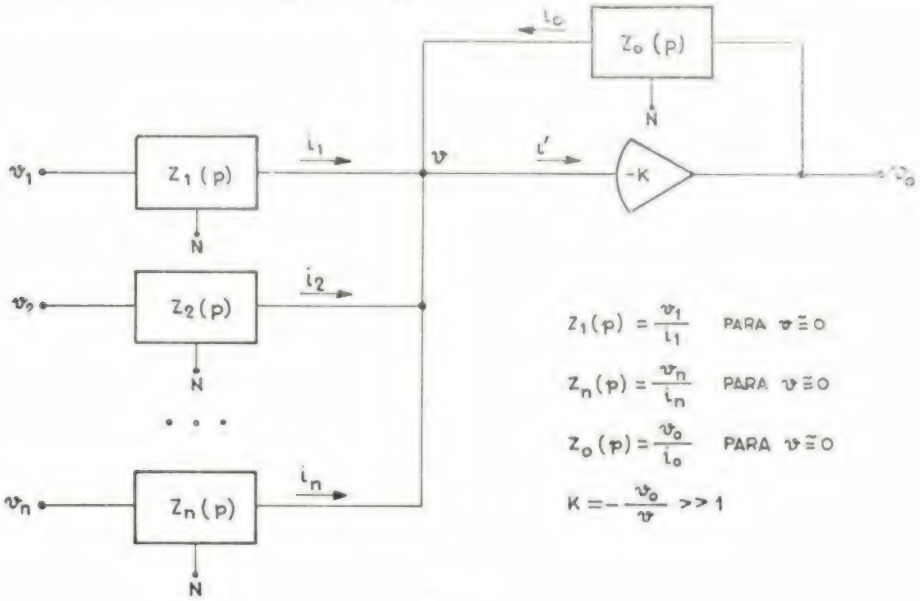



Fig. 12

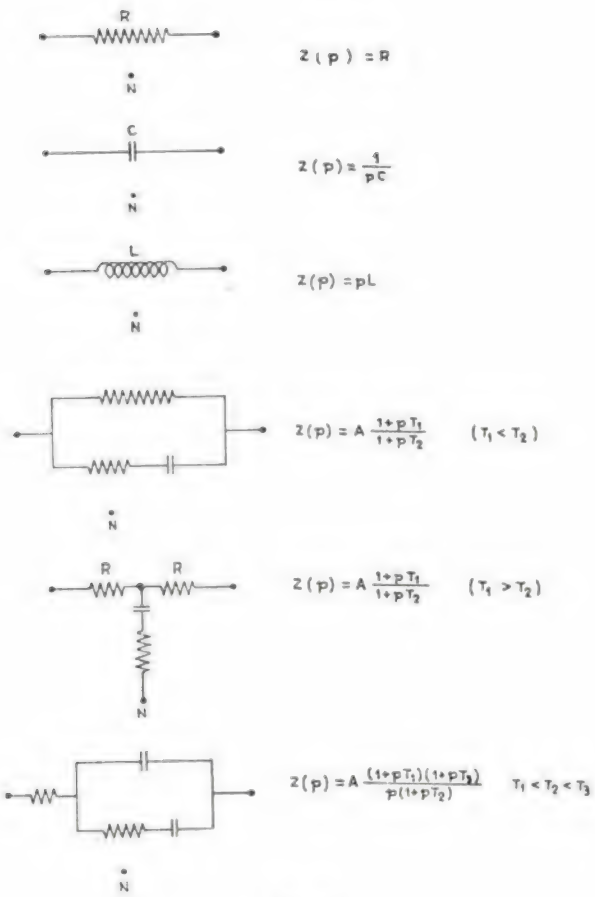



Fig. 13

Considerem-se alguns casos muito simples:

1). Se as impedâncias Z são constituídas simplesmente por resistências, vem

$$5.3)\quad v_o = -\left[\frac{R_o}{R_1} v_1 + \frac{R_o}{R_2} v_2 + \cdots + \frac{R_o}{R_n} v_n\right].$$

Portanto, $v_o$ será uma combinação linear, de coeficientes negativos, das grandezas $v_1, v_2, \ldots v_n$.

2). Como caso particular da hipótese anterior, se só existir um circuito de entrada, tem-se

$$5.4)\qquad v_o = -\frac{R_o}{R_1} v,$$

isto é, $v_o$ é proporcional e de sinal contrário a $v_1$.

3). Ainda como caso particular do anterior, se $R_o = R_1$ vem

$$5.5)\qquad v_o = -v_1,$$

e tem-se um circuito inversor de sinal.

4). Seja um só circuito de entrada e

$$Z_1(p) = R$$

$$Z_o(p) = \frac{1}{pC}.$$

Vem

$$5.6)\quad v_o = -\frac{1}{pRC} v_1 = -\frac{1}{RC}\int_o^t v_1\, dt + v_o(t = o),$$

isto é, tem-se que $v_o$ é proporcional ao integral de $v_1$, sendo o factor de proporcionalidade negativo.

Os elementos $Z_1, \ldots Z_n, Z_o$, podem não ser lineares. No caso de elementos ohmicos, podem obter-se assim relações funcionais. Na fig. 14 indica-se um exemplo muito simples.

### 5.2 — Servomultiplicador

Um dos processos mais rigorosos de fazer a multiplicação é recorrer a um servomultiplicador, que pode ser por exemplo constituído conforme indicado na fig. 15.

Utilizando um multiplicador e um circuito somador, pode efectuar-se a divisão (fig. 16).

Vem, supondo o ganho do amplificador muito elevado, e z finito,

$$5.7)\qquad zy + x = 0,$$

donde

$$5.8)\qquad z = -\frac{z}{y}.$$

### 5.3 — Geradores de funções

Elèctricamente, as funções do tempo podem ser obtidas provocando regimes livres em circuitos, a partir de condições iniciais, e transformando esses regimes por meio de relações obtidas com elementos do calculador.

Para funções arbitrárias, uma solução simples é obter um potenciómetro cujo cursor se desloque com velocidade constante, p.e. a partir da obtenção do valor x num potenciómetro acoplado no mesmo veio, sendo x o integral em relação ao tempo de uma tensão constante.

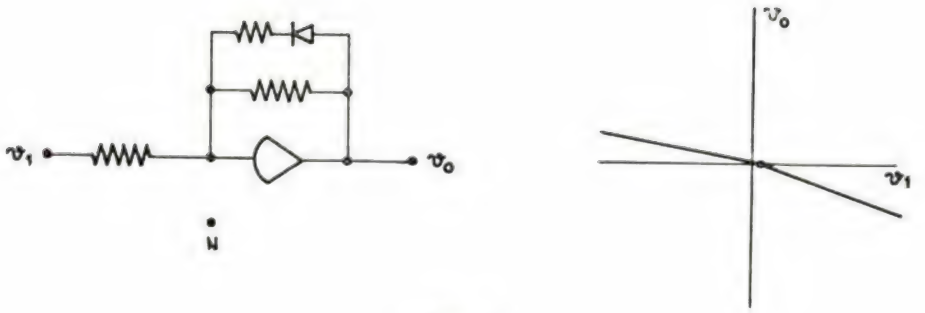



Fig. 14

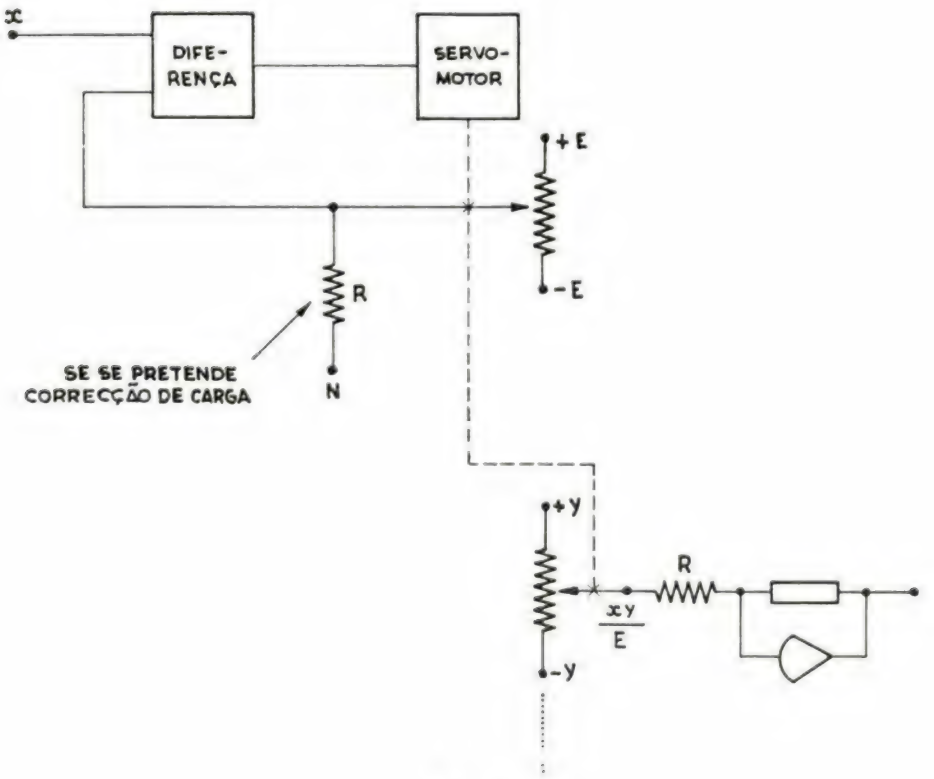



Fig. 15

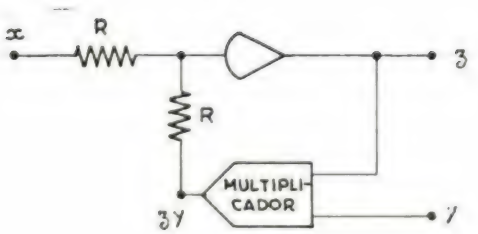



Fig. 16

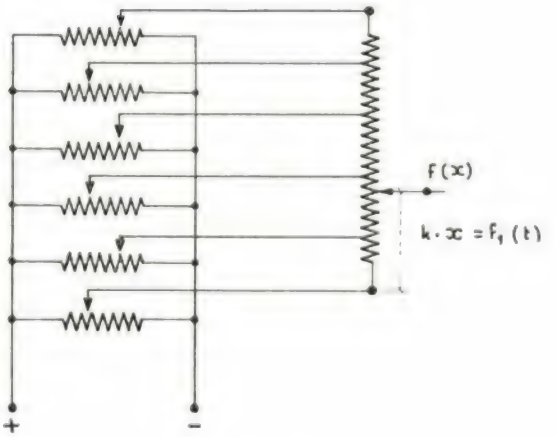



Fig. 17

### 5.4 — Elementos de saída

A saída mais frequente dos calculadores operacionais é o registo de tensões em função do tempo, utilizando-se para o efeito, por exemplo:

— Oscilógrafos catódicos — para resoluções repetitivas.
— Oscilógrafos electromecânicos.
— Servopotenciómetros.
— Voltímetros digitais.
— Fita magnética em registo contínuo.
— » » » » codificado.

## 6. — MÉTODOS DE APLICAÇÕDS DE CALCULADORES ANALÓGICOS

### 6.0 — Introdução

Com as restrições resultantes do carácter um tanto artificial desta sistematização, podem agrupar-se os métodos de resolução de problemas em calculadores analógicos em directo, indirecto, implícito e de simulação.

Passam a expor-se exemplos de aplicação destes métodos, no caso de calculadores operacionais.

### 6.1 — Método directo

Considera-se o método "directo" quando a função a calcular é expressa por uma relação funcional explícita de uma função que pode ser obtida com gerador de sinal ou gerador de função.

Seja, por exemplo, o cálculo de

$$6.1)\quad x(t) = \frac{\int_0^t f_1(t)\, f_2(t)\, dt}{\int_0^t f_1^2(t)\, dt + a_0}\,.$$

A montagem da fig. 18 permite obter directamente estas grandezas, a partir de dois circuitos funcionais ($F_1$ e $F_2$, correspondentes às relações $f_1$ e $f_2$), três circuitos integradores, dois circuitos multiplicadores e um circuito divisor.

### 6.2 — Método indirecto

Aplica-se o método designado por indirecto quando não é possível ou cómodo estabelecer uma relação explícita, mas é possível estabelecer uma relação implícita, sendo os elementos do calculador ligados por forma a satisfazer a essa relação implícita.

Seja por exemplo a equação:

$$6.2)\quad \dddot{x}(t) + a_1 \ddot{x}(t) + a_2 \dot{x}(t) + a_3 x(t) = f(t),$$

com

$$a_1 > 0$$
$$a_2 < 0$$
$$a_3 > 0$$

ou

$$6.3)\quad \dddot{x}(t) = -\left[ a_1 \ddot{x}(t) + a_1 \frac{a_2}{a_1} \dot{x}(t) + a_1 \cdot \frac{a_2}{a_1} \cdot \frac{a_3}{a_2} x(t) - f(t) \right].$$

A montagem da fig. 19 impõe que as diferentes grandezas satisfaçam a esta condição.

### 6.3 — Método implícito

Este método consiste em estabelecer uma equação que admite a função pretendida como solução.

Seja por exemplo a função

$$6.4)\quad y = a\, e^{-\int_0^t x dt}\,.$$

Vem

$$6.5)\quad \frac{dy}{dt} = -a\, e^{-\int x dt}\, x = -xy\,,$$

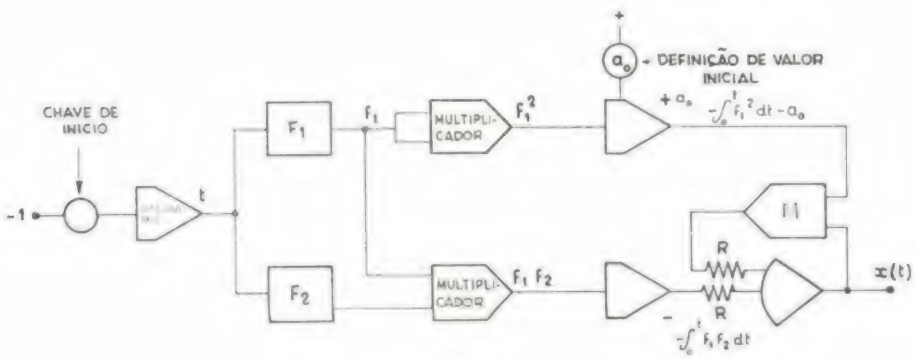



Fig. 18

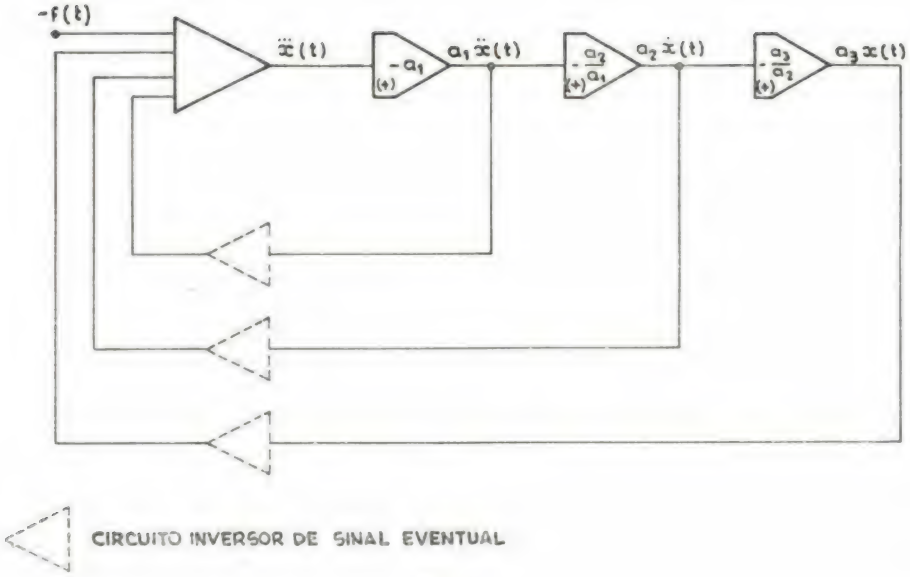



Fig. 19

relação que é imposta pelas ligações no calculador representadas na fig. 20.

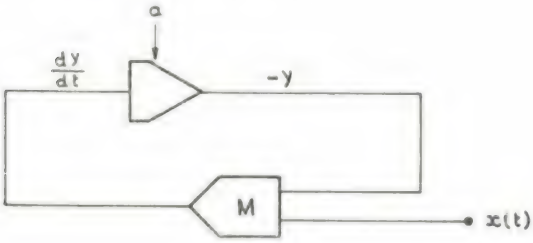



Fig. 20

### 6.4 — Simulação

Suponhamos um sistema físico que se pretende representar num calculador.

Há, em princípio, duas vias de representação:

1 — Redução a um sistema de equações que o definem e resolução desse sistema de equações.

2 — Representação «directa» ou «simulação» de cada parâmetro ou relação num calculador, isto é simular no calculador o sistema.

Um método em certa medida intermédio, consiste numa «transformação» de variáveis ou funções do sistema a estudar, fazendo-se a simulação da «transformada» do sistema.

O método de simulação tem a vantagem de ser muito mais directo, permitir a obtenção de todas as variáveis que intervêm no sistema, averiguar as suas limitações e introduzir não linearidades. Mas perde-se universalidade e por vezes usa-se mal o calculador. Há que procurar para cada caso uma proporção dos dois tipos de atitude.

Seja, por exemplo, um regulador acelerotaquimétrico de uma turbina, de comportamento traduzido pela equação:

$$6.6) \quad \frac{d(\Delta A)}{dt} = -\frac{r_2}{R_1}\left[\Delta N + R_3\frac{d(\Delta N)}{dt} + \frac{r}{r_2}\Delta A - \Delta N_m\right],$$

sendo

- A — abertura do distribuidor da turbina
- $r_2$ — não-linearidade da transmissão servomotor-distribuidor
- $R_1$ — tempo característico do efeito taquímetro-servomotor
- N — velocidade de rotação do grupo
- $R_3$ — dosagem acelerométrica
- $r_4$ — estatismo permanente «curso do servomotor-velocidade»
- $N_m$ — curso do manípulo do dispositivo de regulação de velocidade, expresso na escala de velocidade,

e de esquema lógico correspondente à fig. 21. A sua simulação no calculador é quase imediata, podendo fazer-se conforme indicado na fig. 22.

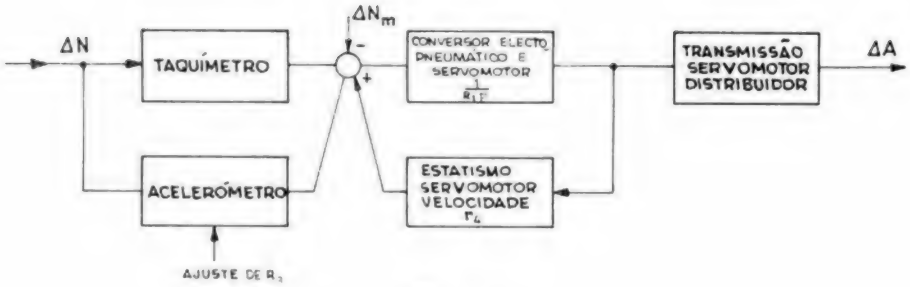



Fig. 21

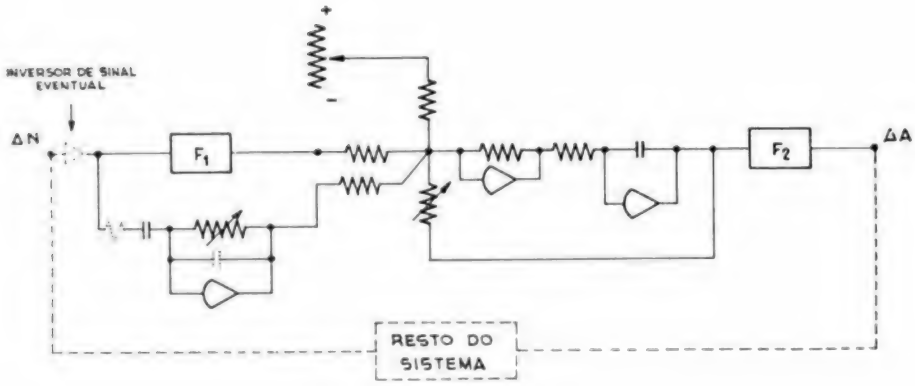



Fig. 22

### 6.5 — Escolha de escalas

Na utilização de calculadores é muito importante a adequada escolha de escalas de tempos e amplitudes das diferentes grandezas.

Quanto à amplitude, há que notar que:

1 — Há um valor máximo que as grandezas no calculador podem atingir, por razões construtivas.

2 — Se os valores forem muito inferiores a esse máximo, perde-se precisão, quer quanto ao erro relativo das grandezas no calculador, quer quanto a possibilidade de medida e registo.

Quanto à escala de tempo, há que notar que:

1 — Consoante os elementos construtivos do calculador, há um máximo da banda de frequências representável ou registável correctamente.

2 — Há fenómenos tipo deriva e outros que impõem um máximo à duração de representação de um fenómeno de tipo transitório.

Há vários processos, no fundo equivalentes, de semiautomatizar o problema de escolha da ordem de grandezas das escalas de amplitude e tempo.

Consoante o tipo construtivo, têm-se as seguintes ordens de grandeza das frequências máximas correctamente representadas:

1 — Calculadores rápidos (sem elementos mecânicos):

$$\omega \lesssim 1000 \text{ rad s}^{-1}.$$

2 — Calculadores médios, p. e. com oscilógrafos mecânicos rápidos ou fita magnética e reprodutores de funções do tipo de registadores fotográficos:

$$\omega \lesssim 100 \text{ rad s}^{-1}.$$

3 — Calculadores lentos, com registadores potenciométricos ou por voltímetro digital e servomultiplicadores:

$$\omega \lesssim 10 \text{ rad s}^{-1}.$$

### 6.6 — Fases da resolução de um problema num calculador analógico

Em geral, podem sistematizar-se da seguinte forma as várias fases da resolução de um problema num calculador :

1 — Determinar o método de solução a partir do estudo do problema — método directo, indirecto, técnica de funções implícitas, simulação, ou misto.
2 — Eventualmente, elaborar um diagrama lógico das funções do calculador.
3 — Definir as escalas de amplitude e tempo.
4 — Elaborar um diagrama completo das ligações do calculador.
5 — Efectuar — geralmente em painel — as ligações correspondentes ao diagrama.
6 — Ajustar os coeficientes e condições iniciais.
7 — Ligar o equipamento utilizado, incluindo elementos de entrada e saída.
8 — Ligar o dispositivo que dá início ao ciclo de cálculo.
9 — Observar ou registar as grandezas e verificar limites de parâmetros intermédios.

C. D. U. 621.311.5/91

# ELEMENTOS SOBRE A PRODUÇÃO E O CONSUMO DE ENERGIA NA REDE ELÉCTRICA NACIONAL (*)

## I — Breve nota mensal

No conjunto do sistema, as afluências do mês de Janeiro totalizaram 300 GWh, correspondendo-lhes uma probabilidade de serem excedidas da ordem dos 98 % e um coeficiente de produtibilidade de 0,34. Estas afluências foram as mais baixas observadas desde que há registos (desde 1922 23), embora não se afastem tanto como as afluências internas dos mínimos anteriormente registados.

O prosseguimento do regime de afluências muito desfavorável durante todo o mês de Janeiro, conduziu à continuação do regime de desarmazenamento nas albufeiras, embora mais moderado que o desarmazenamento registado em Dezembro, dadas as medidas de apoio entretanto tomadas. Assim o armazenamento diminuiu de 71 GWh, situando-se no fim do mês em cerca de 564 GWh, valor este que corresponde a cerca de 27 % do enchimento máximo possível.

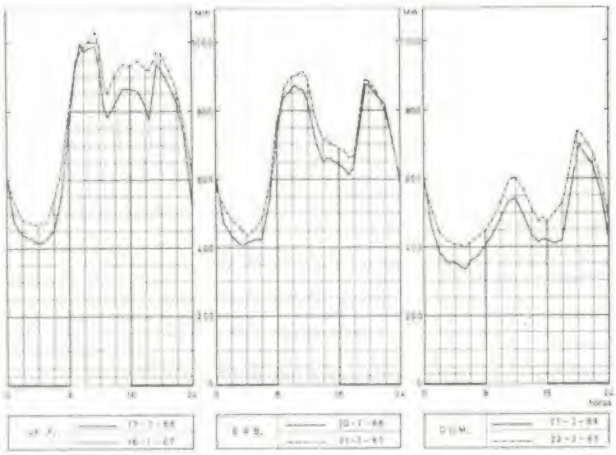
## II — Elementos gerais (GWh)

| | a) Mensais 1967 | a) Mensais 1968 | Variação % |
|---|---|---|---|
| Produção hidráulica ($P_h$) . . . | 521,0 | 371,7 | — 29 |
| Produção térmica ($P_t$) . . . . . | 14,2 | 98,1 | + 591 |
| Produção total ($P_T$) . . . . . | 535,2 | 469,8 | — 12 |
| Energia recebida de empresas não pertencentes ao RNC ($E_r$) | 2,8 | 1,1 | — 61 |
| Exportações (Ex) . . . . . | 0,0 | 1,4 | — |
| Importações (I) . . . . . | 0,0 | 48,3 | — |
| Saldo importador ($S_I$) . . . . . | 0,0 | + 46,9 | — |
| Consumo em bombagem ($C_b$) | 0,0 | 0,0 | 0 |
| Produção para consumos perman. ($P_{cp}$) . . . . | 459,0 | 500,2 | (1) + 9,0 |
| Produção para consumos não perman. ($P_{cnp}$) . . . | 79,0 | 17,6 | — 78 |
| Total . . . . . | 538,0 | 517,8 | — 4 |
| Coeficiente de hidraulicidade | 0,72 | 0,34 | — |

## III — Diagramas de carga dos dias característicos

| | | | | 4.ª feira: 1967 | 4.ª feira: 1968 |
|---|---|---|---|---|---|
| Produção hidráulica | | | ($P_h$) MWh | 18 425 | 12 001 |
| Produção térmica | | | ($P_t$) MWh | 860 | 3 882 |
| Produção total | | | ($P_T$) MWh | 19 205 | 15 883 |
| Trocas com Espanha | Export. | | (Ex) MWh | 0 | 52 |
| | Import. | | (I) MWh | 0 | 2275 |
| Consum em bomb. hidroel. | | | ($C_b$) MWh | 0 | 0 |
| Prod. para cons. perm. | | | ($P_{cp}$) MWh | 16 544 | 17 506 |
| Prod. para cons. não perm. | | | ($P_{cnp}$) MWh | 2 741 | 600 |
| TOTAL | | | $P_T + (I - Ex)$ MWh | 19 285 | 18 106 |
| Características dos diagramas | $P_T + (I-Ex)$ | Potência máx. | MW | 1035 | 1 000 |
| | | Potência mín. | MW | 470 | 414 |
| | | Utiliz. da ponta | horas | 18,6 | 18,1 |
| | | Factor de carga | | 0,78 | 0,75 |
| | $P_{cp}$ | Potência máx. | MW | 915 | 975 |
| | | Potência mín. | MW | 356 | 389 |
| | | Utiliz. da ponta | horas | 18,1 | 18,0 |
| | | Factor de carga | | 0,75 | 0,75 |

## JANEIRO



## IV — Energia armazenada nas principais albufeiras

| Albufeiras: | No fim do mês GWh | No fim do mês % (1) |
|---|---|---|
| Alto Rabagão . . . . . | 289,0 | 29,7 |
| Paradela . . . . . | 40,9 | 18,4 |
| Venda Nova . . . . . | 72,9 | 57,0 |
| Salamonde . . . . . | 9,2 | 33,3 |
| Caniçada . . . . . | 11,9 | 34,0 |
| Vilar . . . . . | 7,0 | 7,0 |
| Cabril . . . . . | 61,1 | 18,0 |
| Castelo do Bode . . . . . | 58,4 | 35,8 |
| Guilhofrei . . . . . | 0,7 | 8,4 |
| Lagoa Comprida . . . . . | 0,6 (2) | 1,4 |
| Santa Luzia . . . . . | 6,9 | 11,2 |
| Pracana . . . . . | 4,7 | 36,4 |
| Póvoa . . . . . | 0,8 (3) | 4,8 |
| Total — com A. Rabagão . . . | 564,1 | 26,6 |
| Total — sem A. Rabagão . . . | 275,1 | 23,9 |

NOTAS

(1) Coeficiente de enchimento em energia das albufeiras.

(2) Inclui 0,7 GWh armazenados em Vale do Rossim no início do mês e 0,1 GWh no fim do mês.

(3) Inclui 0,2 GWh armazenados no açude do Polo no início do mês e 0,3 GWh no fim do mês.

(*) *Elementos extraídos das estatísticas mensais do Repartidor Nacional de Cargas (R. N. C.). As produções e os consumos das empresas do R. N. C. representam cerca de 94 % dos totais do País.*

# CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

PRAÇA DO MUNICÍPIO, 13-3.º — LISBOA 2 • TEL. 36 65 06

## SONDAGENS • FUNDAÇÕES
## TRABALHOS MARÍTIMOS
## PONTES E ESTRUTURAS

SOCIEDADE CENTRAL DE CERVEJAS

Silo para 20 000 t de cereal, na nova fábrica de cerveja em Vialonga, executado com moldes deslizantes

Execução de CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

# INDUSTRIAIS TEXTEIS

PARA OS VOSSOS MANCHONS, FLANELAS, TRANSPORTADORES,
E TODOS OS TECIDOS TÉCNICOS

EM FIBRAS NATURAIS OU SINTÉTICAS

**Consultem:**

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEF.: 52093-52094
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

# Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

**Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português**

DELEGAÇÃO - LISBOA
R.S.Pedro de Alcântara, 1
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
Rua Serpa Pinto, 60
C.P.2178 - Tel.4226

MOÇAMBIQUE
L.Marques - C.P.982 - Tel.741121
Beira - C.P. 1002 - Tel. 71497

C.D.U. 627.824.3 (042)

# ANOTAÇÕES SOBRE BARRAGENS DE TERRA (*)

por JOSÉ FOLQUE
Engenheiro Investigador, Chefe da Divisão de Fundações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RESUMO

*Apresentam-se considerações sobre critérios de escolha do tipo do perfil — zonado ou homogéneo — e discute-se o critério de dimensionamento de filtros e de outros dispositivos para controle das percolações no corpo e na fundação das barragens.*

*Descrevem-se os métodos correntes de dimensionamento de taludes, com especial sublinhado em relação aos métodos mais recentes. Discute-se a possibilidade de introduzir novos metodos em que se atenda à reologia dos materiais constituintes dos maciços.*

*Fazem-se considerações sobre as operações de reconhecimento das manchas de empréstimo e sobre os ensaios de determinação de características mecânicas.*

*Aborda-se o problema do controle de compactação e, por fim, descrevem-se os aparelhos utilizados para observação do comportamento de barragens, discutindo-se o papel desempenhado pela observação no desenvolvimento de novos métodos de concepção, projecto e construção.*

SYNOPSIS

*The author discusses criteria of choice of the profile-zoned or homogeneous — and criteria of design of filters and other arrangements for controlling percolation in the body and the foundation of dams.*

*Conventional slope design methods are described, in special the most recent methods. The possibility of using new methods in which the rheology of the component materials of the embankments is taken into account is considered.*

*The survey of borrow zones and the tests for determining the mechanical characteristics of the borrowed material are discussed.*

*The problem of compaction control is briefly considered and the instruments used in the observation of dams are described, the role of observation in the development of new conceptions, design and construction methods being discussed.*

## INTRODUÇÃO

O objectivo desta série de palestras é comunicar um resumo da experiência portuguesa recente neste domínio. A exposição ordenada e com alguns pormenores dos fundamentos, princípios e métodos da Física dos Solos envolvidos na concepção e no cálculo de dimensionamento de Barragens de Terra não teria aqui cabimento; é disciplina muito bem conhecida no Brasil e, encarando-a deste ângulo, nenhum contributo adicional é fácil aqui trazer.

Mas acontece que os princípios e métodos a que se fez referência estão longe de ser matéria pacífica. As realizações concretas estão dia a dia a questioná-los e nalguns capítulos haverá até talvez revisões urgentes que se impõem. Por isso uma exposição dos problemas que um grupo de engenheiros — neste caso aqueles que em Portugal têm trabalhado neste domínio — têm tido que resolver pode eventualmente resultar fecunda por fornecer uma oportunidade para reflexão e debate em torno de questões que é natural que se apresentem em Portugal com aspectos algo diferentes e que podem ter sido, talvez, encaradas sob outra óptica. Trata-se portanto de expor os aspectos particulares de uma problemática — barragens de terra em Portugal — e em relação a ela apresentar os resultados de nossa experiência e, *sobretudo*, ouvir as sugestões que os Colegas brasileiros terão para apresentar.

Só para ir referenciando os diversos pontos abordados, os princípios e métodos serão sucintamente descritos. Mas a preocupação dominante ao fazer essa descrição será apontar os aspectos peculiares da problemática geotécnica de Portugal no Capítulo de Barragens de Terra, com as correlatas questões que se afiguram zonas de pesquisa mais urgente. Algumas dessas pesqui-

(*) (Palestras proferidas na Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro — Nov. - 1967).

sas já as iniciámos e sobre as orientações adoptadas e até, antes disso, sobre a legitimidade e importância do seu estudo, haverá o maior interesse em ouvir a opinião dos Colegas do Brasil.

Resumindo, será apresentada uma rememoração muito sucinta dos princípios e métodos envolvidos no projecto de Barragens de Terra, para servir de rede de referência aos pontos que à luz da experiência portuguesa se têm afigurado mais questionáveis. Apresentar-se-á em relação a cada um desses pontos o resumo da abordagem que entre nós deles se está tentando. E por fim espera-se que durante os debates e as discussões haverá oportunidade de recolher a contrapartida da própria experiência brasileira sobre idênticas questões.

## 1 — BARRAGENS ZONADAS E HOMOGÉNEAS. CARACTERÍSTICAS QUE DEVEM TER AS TERRAS DOS DIVERSOS ÓRGÃOS DE UMA BARRAGEM. DISPOSITIVOS PARA CONTROLAR A PERCOLAÇÃO. FILTROS

É habitual distinguir dois tipos fundamentais de barragens de terra: barragens com perfil homogéneo e barragens com perfil zonado. É evidente que, em rigor, poucas serão as barragens que poderão ser classificadas como homogéneas. Isto porque as manchas de empréstimo são sempre suficientemente diversificadas para obrigar a direcção da obra a ter que efectuar zonamentos secundários, reservando as terras de características mais favoráveis para zonas consideradas mais críticas e dispondo terras reputadas menos convenientes em zonas de menor responsabilidade. Mesmo assim a classificação tem sentido no seguinte contexto: chama-se barragem de perfil homogéneo aquela em que os dois requisitos fundamentais da barragem — estabilidade e estanqueidade — não são entregues a duas zonas distintas do perfil. Pelo contrário numa barragem zonada distinguem-se um maciço com funções essencialmente vedantes — o núcleo — e maciços exteriores com funções de estabilidade. É evidentemente um caso particular de barragem zonada a barragem mista de enrocamento e terra, em que os maciços de estabilidade são constituídos por enrocamentos.

Em Portugal, as condições geológicas e orográficas conduzem ao seguinte panorama esquemático: na metade norte do País os locais de barragens existem na Meseta, em ocorrências de rochas duras, granitos e xistos. Os vales são acentuadamente encaixados e as disponibilidades de terras elásticas são pràticamente nulas: a barragem de betão é a solução indicada. A geometria dos vales e a boa qualidade da rocha de fundação presta-se à adopção de barragens arco, algumas extremamente esbeltas. É assunto fora do nosso tema e que só se aponta a título de referência. Em duas localizações do Norte de Portugal as condições conduziram a soluções de enrocamento. Mas mesmo nestas barragens optou-se por órgãos de estanqueidade que não são constituídos por solo compactado.

Na metade Sul do País, sobretudo no Alentejo — e actualmente ainda em fase de projecto, na região do Centro mas próximo já do litoral, fora da Meseta — as condições de orografia e geologia são substancialmente diversas.

Os pequenos rios existentes, e que há que aproveitar, abriram seus vales em peni-planícies de xistos do Carbónico. Estes xistos apresentam uma auréola de alteração às vezes bastante possante. Noutros locais ocorrem formações também relativamente brandas do Pliocénico e Pleistocénico. É esta a região do País onde se tem construído a dezena de barragens de terra com volumes relevantes que constitui a experiência portuguesa recente neste domínio.

No que se refere à opção — perfil homogéneo, perfil zonado — tem sido ela fácil de ultrapassar. Com efeito, um perfil zonado terá cabimento quando se disponha de solos granulares, com resistência ao corte sobretudo dependente da componente friccional, razoàvelmente rígido após compactação e com permeabilidade relativamente alta. Serão estes os solos que se destinarão a maciços estabilizadores, havendo que dispor, como é óbvio, de uma mancha de empréstimo em condições aceitáveis de exploração que possa fornecer um solo de permeabilidade bastante baixa para com ele se construir o núcleo. Falham por completo estes requisitos nas manchas de empréstimo disponíveis no Sul de Portugal. Os solos residuais de xisto fornecem material de granulometria muito extensa, com teor elevado em elementos de dimensões finas, capazes por isso de assegurar a estanqueidade de uma barragem. São por outro lado suficientemente resistentes

após compactação para poderem conferir estabilidade ao corpo da barragem sem se ter de adoptar taludes excessivamente suaves.

Mas apresentam peculiaridades de comportamento que merecem exame atento. A essas peculiaridades se fará adiante referência com mais pormenor. Mas há aqui lugar para as mencionar com brevidade, como anúncio às questões que levantam.

*a*) São solos de granulometria muito extensa que vai desde a dimensão da dezena de centímetro até à dimensão argila. Há uma relativa continuidade na distribuição granulométrica. É óbvio que há problemas de comportamento mecânico dominados por estas circunstâncias, entre os quais se apontarão:

— existência de conspícuas componentes friccionais e coesivas, simultâneamente, na resistência ao corte.
— pequena deformabilidade e coeficientes de pressão neutra de valor reduzido.

Poêm-se também, como ressalta do que ficou dito, problemas difíceis de controle de compactação. Com efeito, como definir padrões para compacidade relativa dado que existem no material elementos de grandes dimensões? Em que dimensão se poderá considerar que é lícito situar a fronteira entre grandes elementos *inertes* por não contactarem uns com os outros e por não contribuirem para a resistência do conjunto, e os restantes elementos que formarão assim a matriz significativa da estrutura do solo compactado?

*b*) A granulometria depende não só da ocorrência mas também dos equipamentos de escavação, transporte e compactação.

À custa destas operações e sem grandes dispêndios adicionais, podem-se conseguir granulometrias mais favoráveis.

Numa barragem recentemente construída, na fase de início das terraplenagens, houve oportunidade de estudar com pormenor esta questão. Viu-se assim que não só a granulometria final depende muito do equipamento de extracção, mas era também largamente influenciada pelo número de passagens do cilindro e pela espessura das camadas.

Nessa fase inicial conduziram-se por isso estudos que visaram o acerto do processo de compactação tendo em atenção todos estes parâmetros. E chegou-se, como era de esperar, a um compromisso que levou a que os métodos adoptados se desviassem do rendimento óptimo dos equipamentos de compactação e de escavação, no sentido de se obter um melhor material do ponto de vista granulométrico. Também as influências dos equipamentos de transporte e das operações de espalhamento se revelaram muito significativas.

*c*) A adopção das regras convencionais de dimensionamento granulométrico de filtros depara com dificuldades que resultam da existência de elementos tão finos como os que constituem a fracção argila.

As barragens de terra em Portugal são em regra barragens com fundações fáceis.

Com efeito, efectuado o saneamento do vale, o que em regra se consegue com uma decapagem de 1 ou 2 metros, ocorrem formações rochosas

Para controle das percolações na fundação é usual em Portugal realizar uma cortina de injecções, em geral de calda de cimento. Essas injecções iniciam-se a partir de uma galeria construída no perfil central longitudinal, englobada na fundação. A galeria, órgão evidentemente caro, serve simultâneamente de galeria de inspecção ao longo da vida da obra e permite a retomada de injecções em qualquer época posterior, se inventualmente vier a ser considerado necessário o reforço da cortina de injecções. As pressões de injecção, sobretudo em obras mais recentes, têm sido cuidadosamente controladas de forma a se ficar sempre bastante longe da «rotura hidráulica» do maciço.

As operações de injecção são precedidas de ensaios de injecção de água (ensaios Lugeon). Esses ensaios têm-se revelado decisivos para a escolha das pressões de injecção.

São, estes, evidentemente, tratamentos para solos rochosos fracturados com permeabilidade em grande, por fissuras. Como ficou dito a geologia das fundações das barragens em Portugal não conduz em regra a tratamento diferente. Por isso é muito pequena a experiência que em Portugal se tem podido reunir no que se refere à injecção de solos granulares, com permeabilidade em pequeno.

O terço de jusante da barragem assenta usualmente sobre um tapete filtrante ligado ao filtro de pé de jusante.

Como é sabido, a função dos filtros é evitar a erosão interna, isto é, o arraste de partículas finas, arraste que provoca a prazo mais ou menos longo a perda de resistência por fluidificação de uma zona de maciço. É o «piping» da literatura de língua inglesa, que se designa no Brasil por «entubamento». O dimensionamento granulométrico de filtros é feito a partir de regras empíricas. Segundo essas regras a granulometria de uma camada de filtro é escolhida tendo exclusivamente em conta a granulometria do material a filtrar que lhe fica adjacente.

A base deste tipo de dimensionamento é claramente de pura raiz geométrica: procura-se que o filtro sirva de retenção, pela dimensão do seu poro, às partículas mais finas do solo a proteger.

São bem conhecidas, por exemplo, as regras do Bureau of Reclamation que a seguir se transcrevem:

—Filtros graduados constituídos por materiais com grãos arredondados

$$\frac{D_{50}\ (\text{filtro})}{D_{50}\ (\text{aterro})} = 12 \text{ a } 58$$

$$\frac{D_{15}\ (\text{filtro})}{D_{15}\ (\text{aterro})} = 12 \text{ a } 40$$

— Filtros graduados constituídos por materiais com grão angular

$$\frac{D_{50}\ (\text{filtro})}{D_{50}\ (\text{aterro})} = 9 \text{ a } 30$$

$$\frac{D_{15}\ (\text{filtro})}{D_{15}\ (\text{aterro})} = 6 \text{ a } 18$$

Como se vê a dimensão dos materiais do filtro, fixada em torno dos diâmetros $D_{50}$ e $D_{15}$, é um múltiplo da dimensão dos materiais da camada a filtrar.

Ora acontece que para os solos residuais portugueses a adopção destas regras levaria a ter de adoptar, como primeiras camadas de filtro, materiais extremamente finos, da dimensão silte. É um dado da experiência que estas regras granulométricas de dimensionamento são uma extensão, que tudo leva a crer que seja abusiva, para todos os terrenos, de regras que só são legítimos para solos incoerentes. Uma investigação neste momento em curso em Portugal, para estudo de filtros em materiais coesivos, procura relacionar a granulometria e coesão da camada a filtrar com a dimensão máxima do poro do filtro adjacente. Para isso procura-se, variando aqueles parâmetros e correlacionando-os com o gradiente hidráulico, ajuizar da permanência a longo prazo da granulometria de amostras representativas do solo a filtrar. Por outras palavras está-se procurando, dado um solo coesivo e arbitrando uma dimensão do poro do filtro, saber qual o gradiente para o qual, a longo prazo, se iniciam arrastes de materiais finos. Os arrastes são pesquisados por exame da transparência da água percolada. As amostras são montadas em permeâmetros de 4" de diâmetro com adaptação para receber, pela parte superior, cargas hidráulicas elevadas. Ensaiam-se provetes com 10 cm de espessura. Na parte inferior os provetes repousam sobre uma chapa perfurada de perspex. O diâmetro da perfuração representa, nesta montagem, a dimensão do poro do filtro.

Têm-se conduzido ensaios com gradientes bastante elevados, até cerca de 30, durante alguns meses.

Apresenta interesse referir ainda duas obras, nesta data em fase de projecto, que apresentam condições de fundação muito diferentes das apontadas.

Uma delas é a barragem da Quiminha, em Angola, que se prevê venha a ter cerca de 40 m de altura, fundada em 20 m de aluvião. Numa das margens do vale as formações são predominantemente argilosas, impondo talvez necessidade de adopção de medidas para acelerar a sua consolidação sob a carga que a barragem transmitirá. Na outra margem as formações são predominantemente arenosas, necessitando de tratamento para assegurar a sua estanqueidade.

Para acelerar a consolidação das aluviões argilosas encara-se a possibilidade de instalar drenos de areias. Existe mesmo assim a possibilidade de se darem fissurações, como consequência de assentamentos diferenciais no corpo da barragem, sobretudo na zona de ligação aos encontros.

Mas neste momento os estudos não estão suficientemente adiantados para se ter ideias definitivas sobre o assunto. Também é de aceitar, atendendo ao facto de as argilas em questão serem razoàvelmente rijas, que se venha a concluir que os assentamentos da fundação são compatíveis com a flexibilidade da superestrutura.

Eventualmente mais difícil é o problema que

se põe na barragem de Massingir, no Rio dos Elefantes, em Moçambique. Prevê-se aí construir uma barragem de cerca de 50 m de altura sobre aluviões arenosas com mais de 20 m de espessura. As areias são bastantes soltas, mas por possuirem elementos finos exibem permeabilidades que orçam por $10^{-2}$ cm/s. Não parece difícil, atendendo a certas peculiaridades do aproveitamento, melhorar as condições de estanqueidade da fundação à custa de um tapete impermeável estendido na albufeira, a montante.

O ponto difícil da questão é que a região apresenta uma certa sismicidade. Embora não muito levada, 7 a 8 da escala Richter, pode ser suficiente para que se tenha de encarar a hipótese de «liquefacção» das areias. A liquefacção das areias durante os sismos é hoje o principal obstáculo que se põe à construção de obras fundadas sobre areias pouco ou medianamente densas: O sismo de Niigata veio evidenciar, de forma extremamente impressiva, o risco de liquefacção que apresentam os terrenos arenosos.

Estudos de laboratório, que de resto já se tinham iniciado muito antes do sismo de Niigata, mostram que existe uma «densidade crítica» para baixo da qual uma dada areia entra em liquefacção. Essa «densidade crítica» não é constante para uma dada areia, pois depende da energia posta em jogo pelo sismo. E essa dependência estabelece-se de forma complexa, pois, como de resto se intui, depende da duração do sismo, da frequência e da amplitude. De facto acontece que tanto quanto hoje se sabe sobre sismos, os abalos sísmicos são de curta duração que, para fins práticos pode ser tomada como uma constante: 1 a 2 minutos. No que se refere a frequência, o sismo gera «ruído branco» em que estão presentes as gamas de frequência que vão de 1 Hz a 10 Hz. As frequências fora desta banda, embora presentes, são portadoras de energias pouco relevantes. É portanto, de facto, a amplitude esperada que caracterizará uma dada zona sísmica. É este felizmente um problema que não existe no Brasil. Mas, por notícia, cita-se que nesta data se está procurando determinar qual a energia, em solicitações vibratórias na gama das frequências sísmicas, que produz liquefacção das areias de Massingir. Na hipótese, aliás muito provável, de as areias poderem sofrer liquefacção, não se vê outra solução que não seja proceder à sua compactação prévia. Um processo que se encara, e que nesta data já se encontra em experiência de estaleiro no local, é o processo de vibroflutuação que, como se sabe, consiste em trabalhar com um vibrador gigante de agulha que é cravado no solo com ajuda de injecção de água e que, na retirada, provoca a compactação de uma coluna adjacente de solo.

## 2 — DIMENSIONAMENTO DE TALUDES. MÉTODOS DE CÁLCULO. GENERALIDADES, TIPOS FUNDAMENTAIS DE MÉTODOS DE CÁLCULO. MÉTODOS DE CÁLCULO USUALMENTE ADOPTADOS: MÉTODOS DO CÍRCULO DE $\varphi$ E DAS «FATIAS»

Os métodos de cálculo usualmente adoptados postulam a existência, num maciço que não está em equilíbrio-limite, isto é, no maciço cuja estabilidade se pretende averiguar e que, em regra, tem um estado de tensão *médio* bastante inferior ao que corresponde às tensões médias de rotura, de uma superfície potencial de escorregamento com o mesmo andamento da superfície de escorregamento que se formaria no equilíbrio-limite. Postula-se assim que o estado de tensão independe, ou pelo menos pouco depende do estado de extensão, como acontece de facto num maciço plastificado, mas não num maciço em equilíbrio «hipo-limite». Postula-se ainda que a rotura se dá por uma *superfície*, deslizando em bloco toda a parte do maciço superior a essa superfície, em relação ao remanescente.

A reserva de resistência, isto é, o «coeficiente de segurança», é assim expresso pela relação entre o estado de tensão existente numa superfície de escorregamento de um maciço plastificado, em equilíbrio-limite, e o estado de tensão supostamente existente na *mesma* superfície do *mesmo* maciço, em condições reais, que não implicam a plastificação, nem a determinação de tal superfície de escorregamento.

Os métodos usuais são portanto métodos de cálculo à rotura em que o coeficiente de segurança é o coeficiente de minorização do estado de tensão existente em equilíbrio-limite para o converter no estado de tensão que se admite existir num maciço em equilíbrio «hipo-limite».

É óbvio que todas estas postulações são extremamente discutíveis e parece legítimo pôr-se a questão de saber se os coeficientes de segurança determinados por estes métodos traduzem de

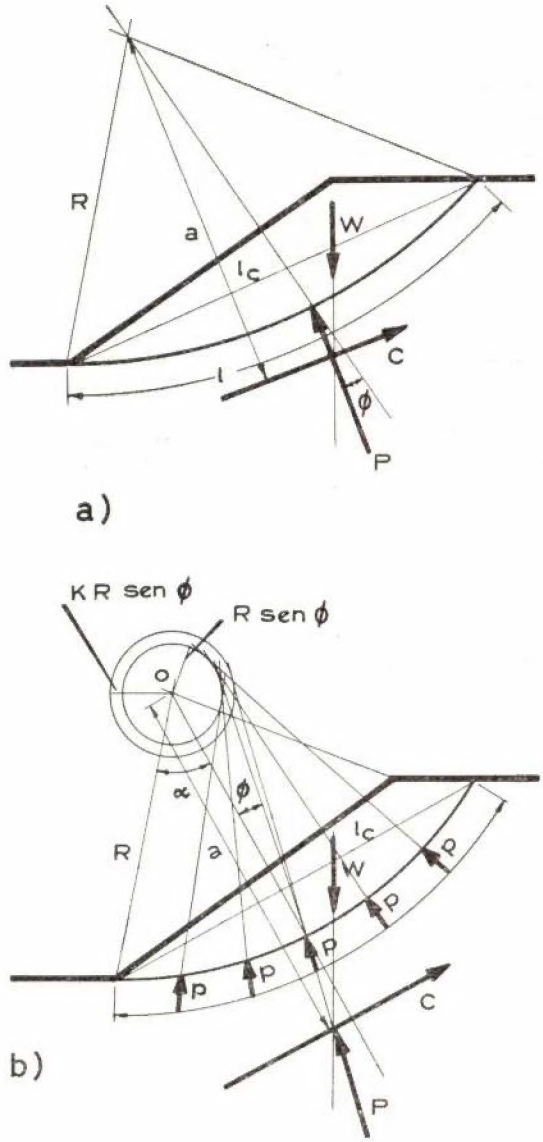
forma adequada, com razoável aproximação, embora sem rigor, a reserva de resistência existente nos maciços. Parece por isso haver cabimento para tentar desenvolver outros métodos em que se procure averiguar o estado de tensão no maciço real, maciço que está em equilíbrio não-limite. É tema que com um pouco mais de pormenor será abordado adiante. Para já interessa só sublinhar que os métodos hoje usualmente utilizados terão de ser encarados como métodos puramente empíricos, cuja legitimidade de aplicação deriva da circunstância de fornecerem, com uma percentagem muito reduzida de inêxitos, regras de dimensionamento de maciços limitados por taludes. Presumìvelmente, pode-se suspeitar, eles conduzem a super-dimensionamentos.

Dentre os métodos clássicos existem métodos que se podem reduzir, em esquema, ao estudo do equilíbrio de forças representado na fig. 2.1 (a). Admitida uma superfície de escorregamento, as forças que terão de equilibrar-se são: o peso próprio da parte do maciço acima da superfície de escorregamento; a resultante das forças resistentes *coesivas* ao longo da superfície de escorregamento e a resultante das forças friccionais, resultante que, dado que se admite o maciço em equilíbrio-limite, terá de fazer o ângulo $\varphi$ com a normal à superfície. Esta última condição tem de ser introduzida para tornar o problema estàticamente determinado.

O método do círculo de $\varphi$, apresentado com algum pormenor na fig. 2.1 (b), é o mais representativo desses métodos. É aplicável a maciços homogéneos, isto é, a maciços que apresentam ao longo da superfície de escorregamento sempre o mesmo ângulo de atrito.

Estuda-se o equilíbrio, pelo método do círculo de $\varphi$, nas seguintes etapas: arbitrada uma superfície de escorregamento, o peso da parte do maciço que tende a deslizar, W, é conhecido em grandeza e linha de acção. A linha de acção das forças coesivas mobilizadas é determinada pelas considerações de momentos que se apresentam na figura: o momento das forças coesivas elementares há-de igualar o momento da resultante das forças coesivas, C, o que permite localizar a linha de acção desta.

Quanto à linha de acção da resultante das forças friccionais mobilizadas, procede-se do seguinte modo: por se postular o equilíbrio-limite as forças friccionais elementares são tangentes a um círculo com centro em O e de raio R. sen $\varphi$; admitindo uma certa distribuição das forças friccionais elementares, por exemplo, como na figura se representa, a distribuição uniforme ao longo da superfície de escorregamento, por considerações de momentos, em que mais uma vez se




**Linha de acção de C**

$C = c\, l_c$

$c\, l\, R = C a$

$c\, l\, R = c\, l_c\, a$

$a = \frac{l R}{l_c}$

**Linha de acção de P**

1) $R \int_{-\alpha}^{\alpha} p\, ds \cos\phi = 2 p \alpha R^2 \cos\phi$

2) $P_t = 2R \operatorname{sen} \alpha p \cos\phi$

2) $2R\, a \operatorname{sen} \alpha p \cos\phi\, R'$

3) $2 p \alpha R^2 \cos\phi = 2R \operatorname{sen} \alpha p \cos\phi\, R'$

$R = \operatorname{sen} \alpha R'$

$K = \frac{R'}{R} = \frac{\alpha}{\operatorname{sen} \alpha}$

Fig. 2.1

atende a que o momento resultante das forças elementares terá de igualar o momento da resultante das solicitações, determina-se o braço R′ do momento $P_t$, componente tangencial de P. Seja

$$K = \frac{R'}{R}$$

e é fácil de mostrar que P terá de ser tangente ao círculo de raio K R sen $\varphi$. É de notar que K depende só do ângulo ao centro e nunca é muito diferente da unidade.

Conhecido assim W em grandeza e direcção, P e C em direcção, pode-se fechar o polígono de forças que permite determinar o valor de C. A relação da coesão *disponível* com a coesão *mobilizada*, pois assim se considera C, é evidentemente uma medida, dentro dos condicionamentos do método, do coeficiente de segurança.

Como se depreende do que fica exposto nada indica que a superfície de escorregamento ensaiada seja de facto aquela que corresponde ao presumível escorregamento que se daria no maciço. Há de facto métodos da Teoria da Plasticidade que permitiriam a localização da superfície de escorregamento do maciço plastificado. Essa superfície é a isogónica das máximas inclinações, admitindo o critério de rotura de Mohr. Com efeito, neste critério de rotura o escorregamento dá-se pelas facetas em que a tensão tem o máximo de obliquidade. E esse máximo é evidentemente $\varphi$. O lugar geométrico das facetas em que a tensão faz o ângulo $\varphi$ com a normal — isogónica de máxima inclinação — será portanto a superfície de escorregamento. Mas de facto não é esta via, de resto bastante trabalhosa, que é seguida nos métodos usuais. Procede-se nestes métodos por tentativas. Ensaiam-se assim diversas superfícies de escorregamento que se afiguram verosímeis e procura-se aquela que conduz ao mínimo coeficiente de segurança.

É fácil de ver como esta pesquisa é delicada e pode gerar lacunas graves. Recentemente, com a introdução dos computadores na prática corrente da Engenharia Civil, este risco diminuiu bastante por ser fácil ensaiar muito numerosos círculos «varrendo» assim toda a possível zona de localização de centros de superfícies de escorregamento.

Este método é, dum ponto de vista didático, extremamente útil para visualizar o efeito, em equilíbrios de taludes, de pressões de água na albufeira e das pressões intersticiais. Considere-se a fig. 2.2 que representa um talude submerso. O estudo do equilíbrio terá agora de ser feito considerando, além do peso próprio, da resultante das forças coesivas e da resultante das forças friccionais, a resultante $U_1$ das pressões exercidas pela água no talude submerso, e a resultante $U_2$ das pressões intersticiais actuantes na superfície de escorregamento. As forças $U_1$ e $U_2$ têm como resultante a impulsão I, igual ao produto do volume submerso pelo peso específico da água. Portanto $U_1$ e $U_2$ equilibrarão uma parte do peso próprio do maciço acima da superfície de escorregamento. O remanescente, que será o peso próprio deduzido da impulsão de Arquimedes, terá de ser equilibrado pelas forças friccionais e coesivas. O que quer dizer que o estudo do equilíbrio poderá fazer-se sem tomar em consideração as pressões da água no paramento e na superfície de escorregamento, contanto que se tome, para determinar o peso da parte do maciço acima da superfície de escorregamento, o peso específico submerso do terreno, isto é, o peso específico aparente deduzido da impulsão.

Também é fácil, usando o método do círculo de $\varphi$, visualizar uma situação de grande importância no cálculo de barragens, por corresponder em regra à mais pejorativa das solicitações: o esvaziamento brusco, ou melhor, o esvaziamento instantâneo. Tomando a mesma fig. 2.2 por referência, o esvaziameuto brusco significa a anulação súbita da força $U_1$. A parcela I do peso próprio deixa por isso de estar equilibrada. Porque se postulou esvaziamento instantâneo é-se forçado a admitir que as forças friccionais mantêm-se inalteradas. De facto P só poderia aumentar se houvesse consolidação com consequente alteração de tensão *efectiva* ao longo da superfície de escorregamento. A resultante das pressões intersticiais ao longo da superfície de escorregamento sofre porém alteração; e atendendo aos condicionamentos expostos, ela fica determinada pela circunstância de, em composição com forças puramente coesivas, ter de equilibrar o acréscimo súbito do peso próprio representado por I. A resultante das pressões intersticiais ao longo da superfície de escorregamento assumirá assim o valor $U'_2$ dado pelo polígono de forças da fig. 2.2. E as forças coesivas mobilizadas sofrem o acréscimo C′. O coeficiente de segurança pas-

será então a ser a relação entre a coesão disponível e o total das coesões mobilizadas, C + C'.

Torna-se bem patente, em relação ao método do círculo de φ, o que existe de precário na análise do equilíbrio efectuada, como consequência de se ter admitido que o maciço estava em equilíbrio-limite. De facto foi essa circunstância, quer dizer, a hipótese admitida de que o maciço estava plastificado, que permitiu fixar a linha de acção dos pp e por consequência a linha de acção da sua resultante. Ora a determinação da grandeza de C, resultante das coesões mobilizadas, baseia-se no conhecimento da linha de acção de P. Se P tiver outra linha de acção, diferente será o valor de C. Nestas condições, como poder de facto admitir que o coeficiente de segurança é a relação entre a coesão disponível e o C por esta via determinado? Por isso será de sublinhar que a expressão quantitativa que fornece arrisca-se a ter um significado com muito pouco conteúdo.

De uso mais generalizado, sobretudo por poder ser aplicado a maciços zonados, em que as superfícies de escorregamento interessam terrenos com diversas características, é o método sueco ou método das «fatias». Postula igualmente a existência de uma superfície de escorregamento acima da qual o maciço tende a deslizar em bloco. Para cálculo das reservas de resistência de um maciço considera-se a zona acima da superfície de escor-

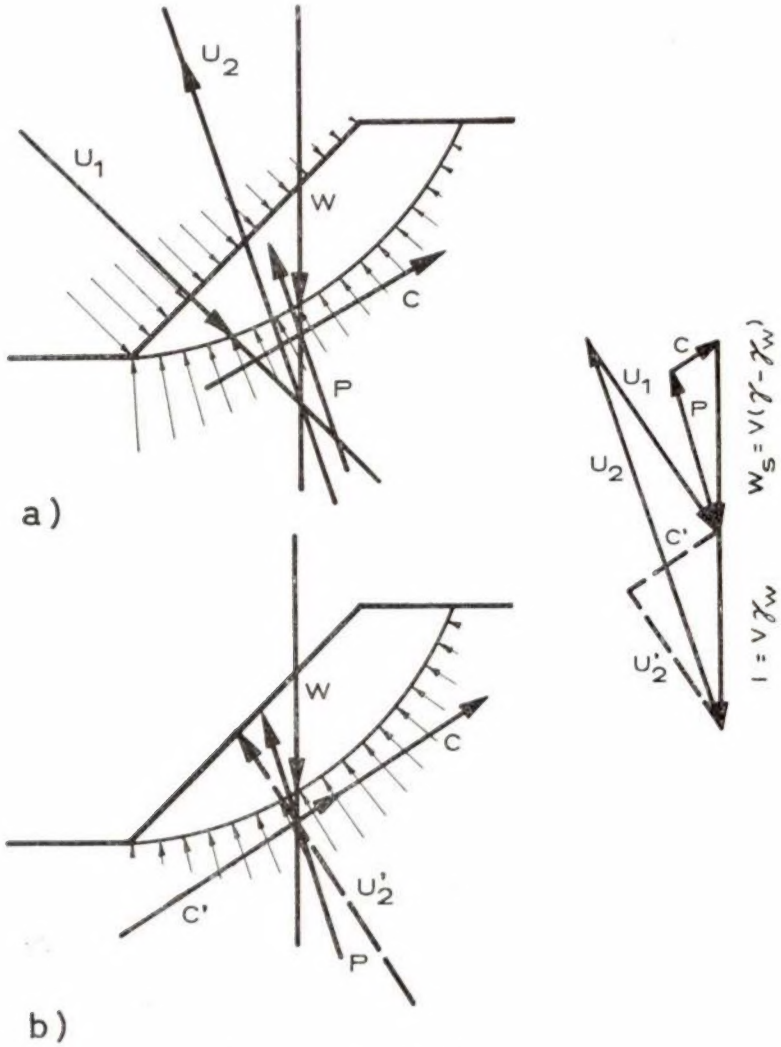
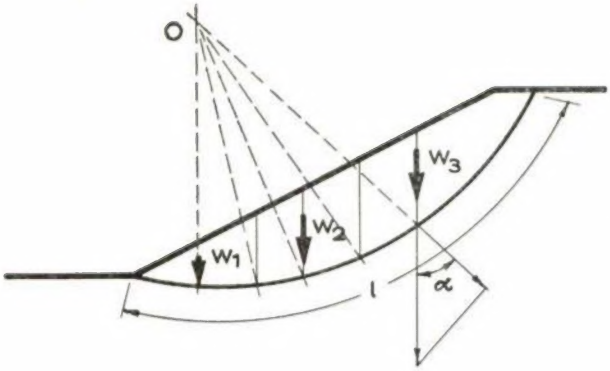



Fig. 2.2




$$T = W \text{ sen } \alpha$$
$$N = W \cos \alpha$$
$$S = \frac{cl + \Sigma N \text{ tg } \phi}{\Sigma T}$$

Fig. 2.3

regamento dividida em «fatias» e estuda-se o equilíbrio de cada «fatia» nas seguintes condições (fig. 2.3):

— despreza-se a inter-acção entre fatias

— a reacção na inter-face fatia—superfície de escorregamento é igual ao peso da fatia, tendo portanto uma componente normal $N = W \cos \alpha$ e uma componente tangencial $T = W \text{ sen } \alpha$.

O equilíbrio de conjunto é julgado admitindo que as forças que tendem a instabilizar o maciço são a soma dos módulos dos vectores T. A estas forças opõe o maciço forças estabilizadoras que serão a resultante da coesão ao longo da superfície de escorregamento adicionada da soma dos módulos das resistências friccionais. Estas, como é evidente, podem atingir no máximo o valor N tg $\varphi$.

Daqui se depreende que o coeficiente de segurança será dado por

$$S = \frac{cL + \Sigma N \text{ tg } \varphi}{\Sigma T}$$

E evidente que, da mesma forma que no método do círculo de $\varphi$, as pressões intersticiais podem figurar no cálculo. Se se puder atribuir valores às pressões intersticiais ao longo da superfície de escorregamento, as forças N que tendem a mobilizar resistências friccionais terão de ser deduzidas das correspondentes pressões neutras.

Em relação ao método das fatias clássico, sem inter-acção entre fatias, será de interesse sublinhar que não é só o facto de desprezar essa inter-acção que torna bem evidentes certos aspectos precários das hipóteses admitidas. Atente-se, por exemplo, na forma como se computam as forças nas facetas de escorregamento, ou se se preferir, na forma como é calculado o estado de tensão ao longo da superfície de escorregamento. Para cada fatia considera-se que a tensão nas facetas que constituem a superfície de escorregamento corresponde ao peso próprio de solo acima da faceta. A tensão total é assim considerada vertical, depois do que se procede à sua decomposição segundo a normal e a tangente à faceta. É evidente que esta forma de determinar o estado de tensão nas facetas do interior de um maciço é uma via de primeira aproximação com muito de discutível, mesmo como primeira aproximação. Não temos muita experiência própria sobre medições de tensões totais em maciços reais. Não são mesmo numerosos os casos em que se tenha procedido à instalação de células de medição de tensão total em barragens de terra. Mas a evidência experimental existente, derivada sobretudo de modelos, mostra desvios muito acentuados em relação às hipóteses simplistas implícitas no método das fatias.

Será importante notar, antes de abordar questões de Física dos Solos envolvidos nesta problemática, e antes de referir o método das fatias generalizado (em que se conta com inter-acção entre «fatias») que o método classico, embora usualmente só empregue com superfícies de escorregamento de directriz circular, pode ser aplicado a quaisquer superfícies de escorregamento cilíndricas. Há interesse em referi-lo porque a pouca informação experimental que sobre o assunto se possui, quase toda baseada em ensaios sobre modelos, parece indicar que as superfícies de escorregamento se afastam bastante do andamento circular. É de notar que não se está a querer fazer referência a uma querela já velha e porventura com interesse prático ultrapassado, sobre a utilização de espirais logarítmicas, ou ciclóides, mas à utilização de curvas compósitas apresentando um ponto de inflexão. Estas curvas apre-